

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COGERAÇÃO A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE CANA-DE-
AÇÚCAR - ESTUDO DE CASO**

ANDRÉIA FRANCO INNOCENTE

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Campus
de Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Março - 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**COGERAÇÃO A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE CANA-DE-
AÇÚCAR - ESTUDO DE CASO**

ANDRÉIA FRANCO INNOCENTE

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Corrêa Saglietti

Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

Março – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

I58c Innocente, Andréia Franco, 1983-
Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-
açúcar: estudo de caso / Andréia Franco Innocente. -
Botucatu : [s.n.], 2011

xi, 111 f. : fots. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2011
Orientador: José Roberto Corrêa Saglietti
Co-orientador: Adriano Wagner Ballarin
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar. 2. Cogeração. 3. Energia. 4. Palhiço.
5. Bagaço. I. Saglietti, José Roberto Corrêa. II. Ballarin,
Adriano Wagner. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agronômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "COGERAÇÃO A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE CANA-DE-AÇÚCAR
- ESTUDO DE CASO"

ALUNA: ANDREIA FRANCO INNOCENTE

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ROBERTO CORREA SAGLIETTI

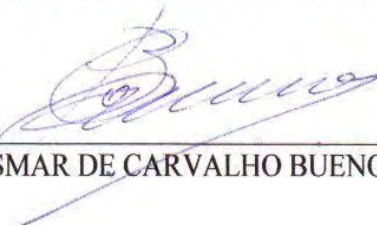
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOSÉ ROBERTO CORREA SAGLIETTI



PROF. DR. MARCO LORENZZO CUNALI RIPOLI



PROF. DR. OSMAR DE CARVALHO BUENO

Data da Realização: 31 de janeiro de 2011.

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Maria Aparecida e Fernando Odair, pessoas que iluminaram o caminho da minha vida e pelo amor infinito que moldaram a pessoa que hoje sou.

Ao meu marido André, meu companheiro incondicional, amoroso, carinhoso, dedicado, amigo e que me auxilia a cada dia no alcançar de meus sonhos.

Aos meus irmãos Luciano e Fernando pelo apoio e amizade em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo seu amor e cuidado para comigo, e pela graça de ter me permitido concluir este trabalho.

Ao Prof. Dr. José Roberto Corrêa Saglietti, pela orientação, incentivo e confiança durante a realização do mestrado.

Ao Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin, meu co-orientador, pelo estímulo e sugestões durante o estudo.

A minha cunhada e amiga Érika, pelo apoio, e por me presentear com os anjos, Bianca e Giovani, que alegram nossa família.

A minha cunhada e amiga Miriam, pela paciência em tirar minhas dúvidas e pela ajuda na obtenção dos dados junto a usina.

As minhas queridas amigas Vanessa e Débora, que mostraram que a amizade verdadeira ultrapassa qualquer barreira.

A CAPES pela bolsa concedida, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

A Usina São Manoel por permitir a realização de estágio, que contribuiu para o desenvolvimento da dissertação de mestrado.

Aos funcionários e colaboradores da Usina São Manoel, que tornaram possível a realização do experimento no campo e experimentos no laboratório da usina.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, agradeço.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	X
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
4.1 Energia e o setor energético.....	8
4.2 Biomassa como fonte alternativa de energia.....	12
4.2.1 Processo de combustão e potencial energético da biomassa.....	15
4.2.2 A tecnologia de geração de vapor a partir da biomassa.....	19
4.3 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil.....	26
4.4 Colheita da cana-de-açúcar.....	30
4.4.1 Legislação.....	30
4.4.2 Colheita sem queima prévia - mecanização.....	32
4.5 A cogeração de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro.....	36
4.5.1 Disponibilidade de biomassa residual de cana-de-açúcar.....	36
4.5.2 Utilização do bagaço como fonte de energia.....	41
4.5.3 Utilização do palhiço como fonte de energia.....	45
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
5.1 Descrição e caracterização da usina onde foi realizada a pesquisa.....	61
5.1.1 Sistema de geração de vapor.....	64
5.1.2 Sistema de geração de energia elétrica.....	68
5.1.3 Corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar	70
5.2 Estimativa da quantidade de biomassa residual de cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) gerada pela Usina São Manoel.....	73
5.3 Determinação das impurezas minerais (terra) do palhiço.....	75
5.4 Caracterização energética do bagaço e palhiço gerados pela Usina São Manoel.....	76
5.4.1 Determinação do teor de umidade e potencial energético do bagaço,	

palhiço e misturas de bagaço/palhiço.....	76
5.4.2 Determinação da quantidade de vapor produzido na queima do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço.....	81
5.4.3 Estimativa do potencial de geração de energia do palhiço e bagaço na Usina São Manoel.....	82
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	84
6.1 Quantidade de biomassa residual de cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) gerada pela Usina São Manoel.....	84
6.2 Teor impurezas minerais (terra) do palhiço.....	88
6.3 Caracterização energética do bagaço e palhiço gerados pela Usina São Manoel.....	90
6.3.1 Teor de umidade e potencial energético do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço.....	90
6.3.2 Quantidade de vapor produzido na queima do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço.....	94
6.3.3 Potencial de geração de energia do palhiço e bagaço na Usina São Manoel.....	95
6.4 Considerações finais.....	96
7 CONCLUSÕES.....	98
8 REFERÊNCIAS.....	99

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Oferta Interna de Energia (OIE).....	10
Tabela 2 - Reações básicas de combustão e calor liberado em cada reação.....	16
Tabela 3 - Composição do bagaço obtida pela análise imediata.....	19
Tabela 4 - Características Técnicas dos Ciclos Tradicionais de Contrapressão.....	26
Tabela 5 - Composição média da cana-de-açúcar.....	27
Tabela 6 - Principais constituintes da cana-de-açúcar.....	27
Tabela 7 - Prazos para redução da queima da palha de cana-de-açúcar nas áreas mecanizáveis.....	31
Tabela 8 - Prazos para redução da queima da palha de cana-de-açúcar nas áreas não mecanizáveis.....	31
Tabela 9 - Estimativa da Disponibilidade de palhiço da cana-de-açúcar (base seca).....	40
Tabela 10 - Quantidade dos constituintes do palhiço para cana-de-açúcar crua e queimada em diferentes variedades.....	41
Tabela 11 - Poderes caloríficos superiores do bagaço de diversos países.....	44
Tabela 12 - Poder calorífico superior do bagaço em função do teor de umidade.....	44
Tabela 13 - Poder calorífico superior do resíduo pós-colheita (palhiço).....	50
Tabela 14 - Teores de umidade do palhiço enleirado e custos das operações de enleiramento.....	51
Tabela 15 - Teores de terra e umidade do palhiço remanescente após o recolhimento com recolhadora de forragem e custos da operação de recolhimento do palhiço enleirado.....	52
Tabela 16 - Teores de terra e umidade do palhiço recolhido e custos totais da operação de recolhimento do palhiço enleirado.....	52
Tabela 17 - Umidade dos constituintes do palhiço de diferentes variedades de cana-de-açúcar.....	53
Tabela 18 - Poder calorífico superior dos constituintes do palhiço de diferentes variedades de cana-de-açúcar.....	53

Tabela 19 - Poder calorífico inferior dos constituintes do palhiço de diferentes variedades de cana-de-açúcar.....	53
Tabela 20 - Umidade, poderes caloríficos inferiores e superiores das folhas secas da cana-de-açúcar para diversas regiões do Estado de São Paulo.....	54
Tabela 21 - Poderes caloríficos inferiores do palhiço retirados de diferentes bibliografias.....	55
Tabela 22 - Resultados da aplicação da equação 2 de relação palhiço/cana-de-açúcar considerando a produtividade agrícola média do Estado de São Paulo de 71,3 t.ha ⁻¹	57
Tabela 23 - Descrição da Usina São Manoel para safra de 2008.....	62
Tabela 24 - Bagaço disponível e sua utilização na Usina São Manoel nos anos de 2005 a 2008.....	63
Tabela 25 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida após a queima, cana-de-açúcar colhida crua, cana-de-açúcar colhida por corte mecanizado e cana-de-açúcar colhida manualmente.....	64
Tabela 26 - Parâmetros termodinâmicos das quatro caldeiras da Usina São Manoel.....	64
Tabela 27 - Consumo de bagaço nas caldeiras da Usina São Manoel na safra de 2008.....	65
Tabela 28 - Relatório de energia elétrica da Usina São Manoel no ano de 2008.....	69
Tabela 29 - Custo do corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar na Usina São Manoel – safra de 2008.....	72
Tabela 30 - Perdas na colheita mecânica da cana-de-açúcar na Usina São Manoel em t.ha ⁻¹ – safra de 2008.....	72
Tabela 31 - Misturas de bagaço/palhiço utilizadas para o estudo.....	81
Tabela 32 - Produtividade do palhiço recolhido em área pertencente a Usina São Manoel.....	85
Tabela 33 - Constituintes do palhiço após a separação.....	88
Tabela 34 - Teores de impurezas minerais do palhiço.....	89
Tabela 35 - Teores de umidade dos constituintes do palhiço.....	90
Tabela 36 - Umidade, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e potencial	

energético para o bagaço, palhiço e misturas.....	91
Tabela 37 - Massa de combustível consumida para produção de 395 t _{vapor} .h ⁻¹	94
Tabela 38 - Disponibilidade de bagaço e palhiço na safra de 2008 na Usina São Manoel e quantidade de vapor que poderia ser produzido caso todo bagaço e palhiço fossem usados como combustível nas caldeiras.....	95
Tabela 39 - Potência e energia que poderiam ser geradas na safra de 2008 de acordo com o uso da biomassa residual de cana-de-açúcar.....	96

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Componentes de uma caldeira.....	21
Figura 2 - Esquema do ciclo de cogeração a vapor utilizado nas usinas sucroalcooleiras.....	25
Figura 3 - Produção de cana-de-açúcar no mundo em 2008.....	28
Figura 4 - Cana-de-açúcar processada pelas usinas brasileiras na safra 2008/2009.....	29
Figura 5 - Evolução da produção de bagaço no Brasil de 1990 até 2009.....	38
Figura 6 - Recolhedora de forragens recolhendo o palhiço enleirado.....	46
Figura 7 - (a) Enfardamento prismático, (b) enfardamento cilíndrico.....	47
Figura 8 - Alternativas de recolhimento de palhiço em estudo.....	48
Figura 9 - Simulação do custo do transporte do palhiço até a usina em função da distância.....	50
Figura 10 - Vista geral da Usina São Manoel.....	62
Figura 11 - (a) e (b) Bagaço depositado no pátio da Usina São Manoel.....	63
Figura 12 - (a) Caldeira de pressão de trabalho de 23 kgf.cm ⁻² , (b) caldeira de pressão de trabalho de 23 a 67 kgf.cm ⁻²	65
Figura 13 - Esquema da rede de vapor da Usina São Manoel.....	67
Figura 14 - Dosadores de bagaço: (a) Caldeira de pressão de trabalho de 23 kgf.cm ⁻² , (b) caldeira de pressão de trabalho de 23 a 67 kgf.cm ⁻²	68
Figura 15 - Turbogeneradores da Usina São Manoel: (a) Turbogenerador 3 com potência de 2.000 kW, (b) turbogenerador 4 com potência de 8.000 kW.....	70
Figura 16 - Colheita mecanizada da cana-de-açúcar na Usina São Manoel.....	71
Figura 17 - Transferência da cana-de-açúcar picada do transbordo para o caminhão com reboque.....	71
Figura 18 - Operação de recolhimento do palhiço: (a) gabarito de 1m ² colocado sobre o palhiço, (b) corte lateral do palhiço, (c) recolhimento do palhiço contido dentro do gabarito, (d) solo limpo, final da operação.....	74
Figura 19 - Separação dos constituintes do palhiço em folhas secas, folhas verdes e	

material restante em cima de lona plástica.....	75
Figura 20 - (a) Confeção da pastilha na prensa manual, (b) pastilha de bagaço.....	78
Figura 21 - Conjunto do calorímetro: (A) agitador elétrico, (B) fonte que faz a ignição da pastilha no interior da bomba, (C) recipiente isolante térmico, (D) recipiente com água, (E) bomba calorimétrica, (F) termômetro de mercúrio	78
Figura 22 - Montagem da bomba calorimétrica.....	79
Figura 23 - (a) Tampa que contém as válvulas de entrada e saída de gases, (b) bomba calorimétrica e tampa vazada.....	79
Figura 24 - Produtividades do palhiço – comparação entre diversos estudos.....	85
Figura 25 - Frequência das faixas de produtividade do palhiço (histograma).....	87
Figura 26 - Teores de terra do palhiço – comparação entre diversos estudos.....	89
Figura 27 - Teores de umidade do palhiço – comparação entre diversos estudos.....	91
Figura 28 - (a) Comparação entre o PCS e PCI para as diferentes misturas de bagaço+palhiço, (b) comparação entre o PCS e PCI para as diferentes umidades das misturas de bagaço+palhiço.....	92
Figura 29 - Poderes caloríficos superiores para o (a) bagaço e (b) palhiço – comparação entre diversos estudos.....	93

1 RESUMO

Os resíduos do processamento da cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) são uma importante fonte energética. O palhiço pode ser adicionado ao bagaço e ambos podem ser queimados nas caldeiras das usinas, como fonte para cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. A usina sucroalcooleira “São Manoel”, situada no município de São Manuel – SP, em seu sistema de cogeração, utiliza o bagaço como combustível para as caldeiras, gerando energia para suas operações. O bagaço produzido não é totalmente consumido e o excedente é vendido para usinas e outras empresas da região. Este trabalho buscou verificar o potencial de cogeração desta usina, considerando o uso da biomassa residual (bagaço e palhiço) de cana-de-açúcar disponível. Assim determinou-se a produtividade do palhiço (20 t.ha⁻¹), que foi separado em folhas verdes (14,9%), folhas secas (71,3%), e material restante (colmos, ponteiros e matéria estranha) (8,3%). O teor médio de impurezas minerais presentes nas amostras de palhiço recolhidas foi de 5,4%. O teor de umidade do palhiço foi medido 3 dias após a colheita para cada constituinte e o valor médio final foi de 28,7%. O bagaço apresentou umidade média de 49,81%. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado para o bagaço (19,27 MJ.kg⁻¹), palhiço (17,90 MJ.kg⁻¹) e misturas de bagaço+palhiço em diferentes proporções. Para o poder calorífico inferior (PCI), observou-se que no palhiço a energia liberada (12,11 MJ.kg⁻¹) foi maior que para o bagaço (8,55 MJ.kg⁻¹), resultado esperado considerando-se o maior teor de umidade do bagaço. Das misturas analisadas, a de 50%-50%

apresentou maior potencial energético (PCI de $10,08 \text{ MJ.kg}^{-1}$), mostrando que o palhiço pode ser eficiente para produção de energia misturado ao bagaço desde que sejam feitas as adaptações necessárias nos processos e maquinários. A energia que poderia ser gerada na safra de 2008 com o uso da biomassa residual, supondo-se que toda cana-de-açúcar fosse colhida crua, seria de 227.989 MWh, além da efetivamente produzida naquele ano, o que proporcionaria um aumento de R\$ 35 milhões, no faturamento da Usina.

COGENERATION FROM RESIDUAL BIOMASS OF SUGAR CANE – CASE STUDY. Botucatu, 2011. 111 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANDRÉIA FRANCO INNOCENTE

Adviser: JOSÉ ROBERTO CORRÊA SAGLIETTI

Co-adviser: ADRIANO WAGNER BALLARIN

2 SUMMARY

Waste from processing sugar cane (bagasse and trash) has become an important energy source. Trash can be added to the bagasse and both can be burned in the boilers of the mills, as source for the cogeneration of electricity in the sugar cane industry. “São Manoel” sugarcane mill, located in São Manuel – São Paulo state, uses trash as fuel for boilers in its cogeneration system, generating energy for its operations. The bagasse produced is not completely used, and the surplus is sold to mills and other companies in the region. This study aimed at checking the cogeneration potential of such mill by considering the use of the residual biomass (bagasse and trash) of the available sugar cane. This way, trash productivity was determined (20 t/ha), which was separated into green leaves (14.9%), dry leaves (71.3%), and remaining material (stalks, pointers and extraneous matter) (8.3%). The content of mineral impurities present in the samples of trash collected was 5.4%. The content of trash humidity was measured for each constituent and the average final score was 28.7%. The bagasse presented average humidity of 49.81%. The higher heating value (HHV) was determined for the bagasse (19.27 MJ.kg⁻¹), trash (17.90 MJ.kg⁻¹) and mixings of bagasse+trash in different proportions. For lower heating value (LHV), it was noted that for the trash, the energy released (12.11 MJ.kg⁻¹) was higher than for the bagasse (8.55 MJ.kg⁻¹), which was expected once bagasse has a higher humidity content. From the mixings analyzed, the 50%-50% one presented a higher energy potential (LHV of 10.08 MJ.kg⁻¹), which shows that trash can be efficient in energy production when mixed to bagasse once necessary adaptations have been made both in the procedure and machinery. In the 2008 crop, the energy which could be created using the residual biomass, supposing that all the sugar cane was picked raw, would be 227,989 MWh,

plus the effective production of that year. This would result in a R\$ 35 million raise in the mill billing.

Keywords: cogeneration, trash, bagasse.

3 INTRODUÇÃO

A maior parte da energia consumida em todo mundo provém, essencialmente, de combustíveis fósseis e, em que pese a importância dessa fonte, há uma preocupação em relação à sua possível exaustão no futuro, além de outras consequências ambientais, visto que a queima dos combustíveis fósseis gera poluentes, trazendo mudanças climáticas (BERNDES et al., 2003).

Dentre as alternativas renováveis existentes, em relação aos combustíveis fósseis, a biomassa tem despertado maior interesse. A biomassa é um recurso renovável proveniente de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada como fonte de energia (SILVA et al., 2004). Possui algumas vantagens tais como: é um recurso renovável; tem baixo custo de aquisição; não emite dióxido de enxofre; as cinzas são menos agressivas ao meio ambiente que as provenientes de combustíveis fósseis; provoca menor corrosão nos equipamentos (caldeiras, fornos); tem menor risco ambiental e suas emissões não contribuem para o efeito estufa (GRAUER; KAWANO, 2008).

Um dos recursos renováveis de grande disponibilidade, em especial no Brasil, é a biomassa derivada da cana-de-açúcar constituída pelo bagaço e pelo palhiço. O bagaço é o produto fibroso resultante do esmagamento da cana-de-açúcar para extração do caldo e o palhiço é o material remanescente da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia (palha, folhas verdes, ponteiros e/ou suas frações, frações de colmos industrializáveis ou não, eventualmente frações de raízes e partículas de terra a eles aderida) (RIPOLI, 2004). De

acordo com Couto et al. (2004) durante muito tempo o bagaço foi queimado nas usinas para gerar calor substituindo a lenha, porém com o objetivo maior de consumi-lo o máximo possível e evitar os transtornos que trazia para indústria, como sujeira, ocupação de espaço, necessidade de transporte, etc. Atualmente o bagaço de cana-de-açúcar é usado como combustível nas caldeiras, em sistemas de cogeração, onde, vapor é produzido para o uso em processos industriais e empregado para geração de eletricidade.

O rápido aumento na produção da cana-de-açúcar gera um desafio importante a ser considerado em relação ao aspecto social e ambiental devido à queima do palhiço antes da colheita da cana-de-açúcar. A principal razão para o uso da queima é a limpeza do canavial com a finalidade de facilitar a operação de corte tanto manual quanto mecânico e diminuir os acidentes de trabalho dos cortadores de cana-de-açúcar. No entanto a queima pré-colheita pode causar poluição ambiental, problemas de saúde aos cortadores de cana-de-açúcar e a população em geral, danos a fauna e a flora, atingir reservas e mananciais, danificar redes elétricas, etc. Hoje existem leis que estabelecem prazos para o fim da queima na pré-colheita, com o objetivo de minimizar os problemas mencionados anteriormente (RIPOLI; RIPOLI, 2009).

O palhiço que fica sobre o solo após a colheita da cana-de-açúcar crua, pode ser recolhido, transportado até a usina e incorporado ao bagaço na produção de energia elétrica. O palhiço é mais uma fonte de energia renovável abundante, pois um hectare de cana-de-açúcar pode fornecer uma quantidade de palhiço da ordem de 9 a 32 toneladas (considerando-se seu peso em base úmida e em função de variedade, época de colheita etc) (RIPOLI e RIPOLI, 2009), sendo que 50% podem ser utilizados na geração de energia, pois a outra metade, por questões agrônômicas deve ficar no campo (ALVES et al., 2008).

Além disso a cogeração no setor sucroalcooleiro representa uma forma descentralizada de produção de energia, próxima aos centros de consumo (principalmente na área do Centro-Sul), reduzindo custos de transmissão e a perda de energia (GUIMARÃES, 2007 e ESCOBAR, 2003), principalmente entre abril e novembro, no Centro-Sul, período em que as usinas fornecem energia elétrica excedente para as distribuidoras, coincidindo com a época de redução de chuvas, quando os níveis dos reservatórios das hidrelétricas estão mais baixos.

Segundo exposto o palhiço pode ser adicionado ao bagaço, e ambos podem ser queimados nas caldeiras das usinas e aproveitados como fonte para cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. Assim é necessário que estudos sejam realizados, para se conhecer o potencial energético do bagaço e do palhiço a fim de se estimar a proporção ideal da mistura, em termos econômicos, que pode ser efetivamente usada como combustível, levando-se também em consideração detalhes operacionais das caldeiras. Esses estudos e os resultados obtidos permitirão a criação de uma base teórica importante, que fornecerá subsídios para futuras aplicações em situações reais, tornando possível o desenvolvimento de uma nova fonte alternativa de energia baseada na biomassa de cana-de-açúcar. Não menos importante, a utilização do palhiço na cogeração irá colaborar com a eliminação da queima pré-colheita, minimizando alguns problemas socioambientais.

O presente trabalho visou o estudo do aproveitamento do bagaço e palhiço como elemento combustível na usina sucroalcooleira “São Manoel”, situada no município de São Manuel, estado de São Paulo. Esta usina utiliza um sistema de cogeração como autoprodutor, usando o bagaço como combustível nas caldeiras, gerando energia suficiente para suas operações, sendo que o bagaço excedente é vendido para usinas e outras empresas da região. Este trabalho teve como objetivo fazer um levantamento inicial do potencial energético da biomassa residual de cana-de-açúcar (palhiço e bagaço) produzida nesta usina, para que futuramente a mesma possa utilizar estes combustíveis na cogeração de energia elétrica e comercialização do excedente.

Para tal foi necessário quantificar a disponibilidade de bagaço e palhiço gerados na safra de 2008, e caracterizá-los, bem como suas misturas, em termos de suas propriedades físicas de modo a definir seus valores energéticos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Energia e o setor energético

De acordo com Vasconcelos et al. (2007), a capacidade de produzir trabalho seja do homem, das máquinas ou dos fenômenos naturais é chamada de energia. Historicamente, a energia disponibilizada para executar trabalho, nas antigas civilizações, era a força física do homem e dos animais como bois, cavalos e outros. Porém, avanços tecnológicos permitiram à humanidade usar a energia concentrada disponível na natureza, armazená-la e utilizá-la conforme suas necessidades.

Conhecimentos teóricos das possibilidades de transformar calor em movimento, tração elétrica e magnética já existiam entre os cientistas de Alexandria há cerca de 200 anos a.C. No entanto, somente no início do século XVIII é que esses conhecimentos passaram a ter aplicações, quando na Inglaterra surgiu a primeira máquina de bombear água movida a calor. Na segunda metade do século XVIII, foi inventada a máquina a vapor e no século XIX, os motores a combustão e as turbinas. Por meio dessas invenções o homem passou a não mais utilizar somente a força muscular própria ou de animais para realizar trabalho (VASCONCELOS et al., 2007).

Ainda no século XIX, o carvão foi utilizado como combustível nas máquinas a vapor, que, de acordo com Grimoni et al. (2004) foi a primeira forma de conversão

de combustíveis fósseis em energia. Mais tarde, o petróleo e o gás natural também passaram a ser utilizados nessas máquinas e se tornaram grandes fontes de energia. Nesse momento inicia-se o desenvolvimento da exploração de fontes de petróleo e surge a economia de energia fóssil (carvão, petróleo e gás natural). A eletricidade surge no final do século XIX, tornando possível o aumento do desenvolvimento humano.

Crises energéticas sempre trazem à tona a vulnerabilidade do sistema de geração concentrada em poucos combustíveis, tornando-se assim, as fontes alternativas, soluções que podem atender de forma satisfatória as comunidades (KAZAY; LEGEY, 2002). A partir da crise mundial do petróleo de 1973, prestou-se maior atenção à biomassa como fonte alternativa, e a partir daí surgiram no mundo todo, vários programas nacionais visando obter maior eficiência nos sistemas de combustão e gaseificação da biomassa, conforme cita o trabalho de Oliveira e Lobo (2002). Políticas, legislações e financiamentos são indispensáveis a fim de viabilizar o uso de fontes alternativas, que no momento ainda são muito dispendiosas e pouco eficientes.

Tanto a redução dos gases que causam o efeito estufa, como a diminuição dos estoques de combustíveis fósseis, vem contribuindo para que as fontes alternativas, principalmente aquelas renováveis e não-poluentes, se destaquem. De acordo com Kazay e Legey, (2002), dentre as várias fontes alternativas de energia, as mais importantes, por ordem de potencial estimado, no Brasil são: a eólica (57 GW); a solar fotovoltaica (14,3 GW); a obtida a partir da biomassa (20 GW); e as pequenas centrais hidrelétricas ou PCHs (9,5 GW).

A Tabela 1 apresenta dados retirados do Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008), onde se nota a evolução do setor energético desde 1970 até os dias atuais com relação a oferta interna de energia.

Em 2007, a Oferta Interna de Energia (OIE) foi de 238,8 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), montante 256% superior ao ofertado em 1970 e equivalente a 2% da demanda mundial. A indústria de energia no Brasil responde pelo abastecimento de 92% do consumo nacional tornando-se importante setor da infra-estrutura econômica. Os 8% restantes são importados, principalmente petróleo e derivados, carvão mineral, gás natural e, energia elétrica.

Tabela 1 - Oferta Interna de Energia (OIE)

Ano	Oferta Interna de Energia (OIE)								Dependência externa de energia (%)
	Total (10 ³ tep ¹)	Energia renovável (%)	Energia não renovável (%)	Petróleo, gás natural e derivados (%)	Carvão mineral e derivados (%)	Hidráulica e eletricidade (%)	Lenha e carvão vegetal (%)	Produtos da cana (%)	Outras ² (%)
1970	66.945	58,4	41,6	37,9	3,6	5,1	47,6	5,4	0,3
1973	82.157	50,9	49,1	46,0	3,1	6,1	38,8	5,6	0,4
1975	91.385	48,0	52,0	48,4	3,5	6,8	36,3	4,6	0,4
1977	99.653	45,8	54,2	49,9	4,3	8,1	30,9	6,4	0,5
1979	112.363	43,9	56,1	51,3	4,8	8,9	27,0	7,3	0,7
1981	110.076	47,6	52,4	47,1	5,2	10,2	27,6	8,8	1,0
1983	115.385	51,1	48,9	43,0	5,9	11,3	26,2	12,6	1,0
1985	131.005	51,8	48,2	39,8	7,6	11,8	25,1	13,6	1,9
1987	142.677	50,9	49,1	41,4	7,4	12,2	23,0	14,4	1,5
1989	146.811	50,3	49,7	42,1	7,3	13,3	22,4	13,2	1,7
1991	144.926	48,3	51,7	43,8	7,6	14,5	18,4	13,8	1,9
1993	149.699	47,1	52,9	45,4	7,4	15,1	16,6	13,5	2,1
1995	162.975	45,3	54,7	46,7	7,4	15,3	14,3	14,0	2,4
1997	180.683	43,1	56,9	49,3	7,0	15,2	12,0	14,0	2,4
1999	189.232	42,3	57,7	50,3	6,7	15,1	11,7	13,3	2,8
2001	193.926	39,3	60,7	51,9	6,9	13,6	11,6	11,8	4,4
2003	201.934	43,7	56,3	47,8	6,7	14,6	12,9	13,4	4,6
2005	218.663	44,5	55,5	48,0	6,3	14,8	13,0	13,8	4,1
2007	238.757	45,9	54,1	46,7	6,0	14,9	12,0	15,9	4,6

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia (2008)

Cerca de 45,9% do total da OIE no Brasil tem origem de fontes renováveis (14% correspondem à geração hidráulica, 28% a biomassa e 3,2% a outras fontes renováveis), enquanto no mundo essa taxa é de 12,9% e nos países desenvolvidos, de apenas 6,2%. A lenha e o carvão vegetal participaram, em 2007, com 12% da OIE, valor este 35,6% inferior em relação a 1970. A Oferta Interna de Energia restante, 54,1%, resulta de fontes fósseis e outras não renováveis. No Brasil esses dados são resultantes do grande desenvolvimento do setor hidrelétrico desde a década de 50 e de políticas públicas adotadas após a segunda crise do petróleo (1979), buscando a diminuição do consumo de combustíveis advindos do petróleo e dos custos correspondentes à sua importação, que na época era responsável por quase 50% das importações totais do País (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

Ainda com base no Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008), na estrutura da Oferta Interna de Energia (OIE), notam-se as significativas transformações, resultantes das políticas adotadas, notavelmente, entre 1979 e 1985. O processo de desenvolvimento dos países implicou na redução natural do uso da lenha como fonte de energia. Atualmente, no caso da queima direta da lenha, há ainda considerações ambientais, pois seu uso indiscriminado é ambiental e tecnicamente desaconselhável com as atuais tecnologias existentes.

No setor agropecuário, os usos rudimentares da lenha perderam gradativamente importância, em razão da urbanização e da industrialização. No setor residencial, a lenha está sendo substituída por gás liquefeito de petróleo e pelo gás natural na cocção de alimentos. Na indústria, especialmente nos ramos alimentícios e cerâmicos, a modernização dos processos leva ao uso de energéticos mais eficientes e menos poluentes.

Vê-se que, no Brasil, a década de 70 foi especialmente marcada pela substituição da lenha por derivados de petróleo, o que reduz significativamente a sua participação na Oferta Interna de Energia. Em 1970, a participação das fontes não renováveis para produção de energia primária chegava a 21%, enquanto para as fontes renováveis estava em torno de 79%. Verificando os dados de 2007, é observada uma inversão, sendo que as fontes não renováveis têm maior participação na produção de energia primária (51,3%) em

relação às fontes renováveis (48,7%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008).

Diante das perspectivas de esgotamento das fontes energéticas não-renováveis, destaca-se a necessidade de se repensar o processo de desenvolvimento econômico de forma a não comprometer o atendimento à demanda das gerações futuras (MULLER, 2005).

4.2 Biomassa como fonte alternativa de energia

No campo da energia, o termo biomassa descreve todas as formas de plantas e derivados que podem ser convertidos em energia útil como madeira, resíduos urbanos e florestais, grãos, talos, óleos vegetais e lodo de tratamento biológico de efluentes. A energia gerada pela biomassa também é conhecida como “energia verde” ou “bioenergia”.

Segundo Vasconcelos et al. (2007), a biomassa energética é o resultado obtido da atividade fisiológica das plantas, que podem se comportar como verdadeiras usinas, podendo assim transformar a energia solar, por meio do processo fotossintético, em energia química. Quando a biomassa é processada de forma eficiente, química ou biologicamente, extrai a energia armazenada nas ligações químicas e a subsequente "energia" produzida combinada com o oxigênio, o carbono é então oxidado para produzir CO₂ e água. Esse processo é cíclico, e o CO₂ é então disponível para produzir nova biomassa (McKENDRY, 2002).

Muller (2005) cita que, na década de 70, a biomassa foi considerada como alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte. No entanto, a partir de 1985, os preços do petróleo voltaram a cair, desencadeando desinteresse novamente por energias alternativas. Posteriormente, na década de noventa, a biomassa ganha destaque novamente no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável.

Outro fator determinante, segundo o mesmo autor, foi a assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997, onde ficou estabelecido que os países em desenvolvimento deveriam reduzir significativamente emissões de gases de efeito estufa, indicando que a participação de energias renováveis tende a ocupar uma posição de destaque na matriz energética mundial (MULLER, 2005).

Os recursos mundiais de biomassa são abundantes, e existem várias técnicas para produzir energia de maneira economicamente eficiente, em vez das formas não-comerciais utilizadas nos países mais pobres. Em cenários futuros, segundo estudos recentes, haverá muitas vantagens em produzir energia proveniente da biomassa, principalmente quando as fontes de energia renovável se tornarem competitivas em relação aos combustíveis fósseis, o que se espera ser possível por volta de 2020. No Brasil, a biomassa como fonte de energia possui vantagens significativas, principalmente por diversificar a matriz energética brasileira; por contribuir para um desenvolvimento sustentável do país, podendo colaborar para a garantia de suprimento de energia a comunidades isoladas, principalmente nas regiões Norte e Centro Oeste do país e pelas vantagens ambientais (GENOVESE et al., 2006).

Existem também aspectos fundamentais e conjunturais importantes relacionados à biomassa, como por exemplo a oportunidade de utilizar eficientemente os resíduos agrícolas disponíveis no país e as perspectivas de viabilização de projetos que utilizam a biomassa como fonte de energia através dos mecanismos do Protocolo de Kyoto.

Conforme Jannuzzi (2003), a utilização de biomassa na geração de energia é de grande interesse para o país especialmente quando direcionado a usos como na geração de eletricidade, produção de vapor e combustíveis para transporte. Segundo o mesmo autor, o mais importante independente da tecnologia empregada é a redução do custo da matéria prima, incluindo os custos de coleta e transporte. Há ainda o baixo custo de aquisição, liberação de resíduos menos agressivos ao meio ambiente, menor corrosão dos equipamentos, maior utilização de mão-de-obra e a redução das emissões de poluentes, uma vez que estes compostos apresentam balanço nulo de emissão de CO₂ (GRAUER; KAWANO, 2008).

Diante dos avanços tecnológicos, conquistados tanto na área energética, a partir de biomassa, quanto na silvicultura brasileira (aumento de produtividade, melhoramento genético, redução de custos, etc.) é possível prever um cenário favorável ao

desenvolvimento de plantações energéticas (florestas energéticas) como fonte de matéria-prima para geração elétrica (MULLER, 2005).

No Brasil, 60% da energia gerada hoje é proveniente de fontes renováveis. Atualmente, 85% da energia que movimenta o mundo é de origem fóssil e 80% dessa energia tem seu uso concentrado em cerca de 10 países. A contribuição do Brasil na emissão de gás carbônico para a atmosfera é de 0,41%, enquanto que a dos EUA, China, Alemanha, Rússia e Japão, soma 65%. Esse contexto foca a difusão da utilização de biomassa como opção estratégica e social para o planejamento energético do país (GENOVESE et al, 2006).

A energia advinda da biomassa, em 2000, representou 19,40% de toda energia primária consumida no Brasil, sendo 9,12% relativo à lenha. A biomassa tem despertado interesse maior entre as alternativas energéticas renováveis, por ser versátil, através dela podendo se obter combustíveis sólidos, líquidos e gasosos e, com base nesses a eletricidade (VALE et al. 2002). É uma alternativa emergente de energia, fonte de cerca de 14% da energia utilizada no mundo (e 35% de energia nos países em desenvolvimento).

Segundo o Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2008), os principais setores consumidores da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal, álcool e outras fontes primárias renováveis), são o industrial com cerca de 52% do consumo final, o residencial com 13% e de transportes com 14%. Na primeira metade da década de 80, houve a elevação do uso industrial de biomassa, devido a substituição do óleo combustível por carvão vegetal; a produção de álcool utilizando o bagaço de cana-de-açúcar e à expansão da siderurgia a carvão vegetal. Seu consumo nos setores residencial e agropecuário decaiu devido à menor utilização da lenha para cocção.

Uma das formas de utilização da biomassa é por meio da queima direta que produz energia térmica e elétrica, sendo, portanto a biomassa uma fonte primária de energia. Outra forma é através do processamento da biomassa para produção de combustíveis, como a gaseificação, ou de processos biotecnológicos, como a fermentação (GENOVESE et al., 2006).

O valor de cada tipo de biomassa sofre influência das propriedades físicas e químicas das moléculas a partir do qual é feita. O homem tem explorado a energia

armazenada nas ligações químicas da biomassa, por meio da queima desta como combustível e ao ingerir plantas para aproveitar o conteúdo nutricional do seu açúcar e amido.. A biomassa é proveniente de fonte renovável, quer por meio de processos naturais, ou quando disponibilizada como um subproduto de atividades humanas (resíduos orgânicos). Seu potencial derivado de resíduos florestais e agrícolas é em todo o mundo estimado em cerca de 30 EJ por ano, em comparação com a procura anual mundial de energia de mais de 400 EJ (McKENDRY, 2002).

No Brasil, se destacam dentre os principais tipos que podem ser usados como combustíveis, os provenientes da madeira, como a lenha, serragem e cavacos. Além dessas, o bagaço de cana-de-açúcar também é muito empregado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool (GENOVESE et al., 2006).

4.2.1 Processo de combustão e potencial energético da biomassa

De acordo com Cortez et al. (2008), os combustíveis e seu processo de combustão são campos importantes na área tecnológica atualmente. O processo de combustão provê a maior parte da energia utilizada hoje no mundo, como por exemplo, em aquecimento, transporte e geração de energia elétrica (JOSÉ, 2004). O crescimento na oferta de energia calorífica, obtida através dos combustíveis, vem tornando possível a grande atividade industrial atual (HILSDORF et al., 2004).

Combustível pode ser definido, de acordo com Hilsdorf et al. (2004), como qualquer substância que ao reagir quimicamente com outra libera energia na forma de calor. Inúmeras substâncias possuem esta propriedade, especialmente ao reagir com oxigênio, porém poucas são as substâncias consideradas como combustíveis industrialmente importantes. Para ser considerado um combustível industrial, o material deve ser carbonáceo, disponível, desprender grande quantidade de calor quando queimado ao ar atmosférico e o calor produzido deve ser controlável sem esforço (HILSDORF et al., 2004).

A maior parte dos combustíveis tem carbono (C) e hidrogênio (H) como elementos principais da sua composição. Além desses, o oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) também podem estar presentes. Os elementos C, H e S determinam a qualidade do

combustível, ou seja, combustíveis que possuem maior quantidade desses elementos irão liberar mais energia (calor) durante a queima; ao contrário, o oxigênio é indesejável, pois é considerado como já combinado com hidrogênio, diminuindo a quantidade unitária de calor desprendida. O nitrogênio não pode reagir com oxigênio liberando calor, por isso no campo da combustão industrial, baixas quantidades de nitrogênio são desejáveis (HILSDORF et al., 2004).

As reações elementares da combustão estão resumidas na Tabela 2, juntamente com o calor liberado em cada reação, por unidade de massa do combustível. É apresentada a oxidação completa e incompleta do carbono, a oxidação do hidrogênio e a oxidação do enxofre.

Tabela 2 - Reações básicas de combustão e calor liberado em cada reação.

Reagentes		Produtos	Energia liberada
$C + O_2$	$\rightarrow$	$CO_{2(g)}$	$+ 8100 \text{ kcal.kg}^{-1}$
$C + 1/2O_2$	$\rightarrow$	$CO_{(g)}$	$+ 2400 \text{ kcal.kg}^{-1}$
$2H_2 + O_2$	$\rightarrow$	$2H_2O_{(l)}$	$+ 34100 \text{ kcal.kg}^{-1}$
$S + O_2$	$\rightarrow$	$SO_{2(g)}$	$+ 2200 \text{ kcal.kg}^{-1}$

Fonte: Nogueira (2005).

Durante as reações envolvidas na combustão, substâncias gasosas são produzidas, como CO_2 e SO_2 , e são liberadas juntamente com vapor de água sendo chamadas de “gases residuais” da combustão. Para combustíveis sólidos há além dos gases, os resíduos sólidos que compreendem as cinzas (HILSDORF et al., 2004).

Dentre os diversos tipos de combustíveis industriais, o bagaço de cana-de-açúcar e, mais recentemente, o palhico vêm sendo incessantemente estudados, pois permitem a obtenção de energia de modo econômico através da combustão direta. Para iniciar a queima de um combustível é necessário que ele atinja uma temperatura definida, chamada de temperatura de ignição. De acordo com Pellegrini (2002), a temperatura de ignição do bagaço esta entre 500°C e 600°C , com 50% de umidade, e a temperatura da chama pode chegar a 920°C com a mesma umidade.

Cortez et al. (2008) expõem que a potencialidade de um combustível - análise se o mesmo é aproveitado em sua total capacidade - pode ser avaliada pelo

conhecimento preliminar de suas propriedades térmicas e químicas fundamentais, sendo estas o potencial calórico, a composição elementar e a composição imediata.

A composição química elementar consiste no teor em porcentagem de massa dos elementos essenciais que compõe a biomassa: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (U) e material residual – cinzas - (A). A composição química imediata corresponde ao conteúdo porcentual em massa de carbono fixo (CF), voláteis (MV), umidade (U) e cinzas (CZ). O teor de umidade da amostra deve ser determinado pela secagem da mesma, anteriormente as análises de composição elementar e imediata (Cortez et al., 2008).

De acordo com Rodrigues et al. (2002), ao queimar, todo combustível libera uma quantidade de energia (calor), sendo esta quantidade proporcional ao peso do material queimado. A medida do calor obtido pela queima completa do combustível pode ser definida como poder calorífico (PC).

Peres et al. (2007) destacam que a energia contida em um combustível será maior quanto maior for o seu poder calorífico, mostrando assim a importância do conhecimento dessa propriedade para avaliação de um combustível como insumo energético.

O poder calorífico pode ser determinado sob duas bases distintas: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). Perez et al. (2008) e Rodrigues et al. (2002) definiram o poder calorífico superior como sendo a quantidade de energia contida no combustível, considerando que a água gerada na combustão mais aquela já contida no combustível estão no estado líquido. Para o poder calorífico inferior a água gerada na combustão está no estado vapor.

O poder calorífico superior é comumente determinado experimentalmente pela utilização de um calorímetro (SANTIAGO, 2007). A amostra de combustível é queimada em sistema fechado, com oxigênio puro, a volume constante e o calor gerado na combustão é transferido para água do calorímetro (FERREIRA, 2006). Sendo um sistema fechado, a possível existência de água no combustível não acarreta em perda de calor, pois a água é evaporada e novamente condensada. Em aplicações industriais o poder calorífico inferior é o que representa melhor as condições de combustão, pois, em um sistema aberto a água contida no combustível passa do estado líquido para o vapor, escapando do sistema, que

perde energia na forma de calor (ARONI, 2005). O poder calorífico inferior é obtido descontando-se do poder calorífico superior a fração de massa de água do combustível.

O teor de umidade é um fator importante que influencia diretamente o poder calorífico dos materiais. Na queima do combustível úmido, a água é evaporada, portanto parte da energia liberada na combustão é gasta para essa evaporação. Assim, quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia proporcionada pelo combustível. No caso do bagaço, a umidade pode ser diretamente relacionada ao rendimento da combustão. Para Pellegrini (2002), a temperatura de ignição abaixa para 300 °C a 400 °C quando umidade do bagaço esta entre 35% a 40%, aumentando a velocidade da queima, pois a secagem do bagaço na fornalha ocorre em tempo menor. Para umidade em torno de 35% a temperatura da chama pode passar de 1100 °C, fazendo com que haja aumento da transmissão de calor por radiação, condução e convecção nos tubos e recuperadores que compõe a caldeira. Germek (2005) acredita que o poder calorífico do palhiço e o rendimento da geração de vapor utilizado para a transformação de energia elétrica nos alternadores também tem influência da umidade do palhiço, tornando necessário estudar e definir a melhor rota tecnológica de aproveitamento do palhiço e do bagaço para fins de cogeração.

A composição química é, também, uma característica dos combustíveis que influencia o seu rendimento energético. De acordo com Maués (2007), o bagaço e o palhiço, por exemplo, apresentam basicamente a mesma composição química elementar: carbono (~45%), hidrogênio (~6%), nitrogênio (0,5 – 1%), oxigênio (~43%) e enxofre (~0,1%). Alto poder calorífico é obtido quando o combustível apresenta elevada quantidade de carbono e hidrogênio, no entanto o oxigênio possui efeito inverso, ou seja, um combustível com maior quantidade de oxigênio tende a possuir menor poder calorífico (PEREIRA Jr., 2001).

A análise imediata mostra a composição para o bagaço e palhiço conforme a Tabelas 3.

Tabela 3 – Composição do bagaço obtida pela análise imediata.

Composição	Bagaço (%)	Palhiço (%)		
		Folhas verdes	Folhas secas	Ponteiros
Carbono fixo	13	11,7	10,8	11,6
Voláteis	83	85,2	85,8	84,1
Cinzas	4	3,2	3,3	4,3

Fonte: Corrêa Neto e Ramon (2002).

O bagaço e o palhiço apresentam um elevado teor de voláteis, assim, mesmo com alto teor de umidade, estes resíduos apresentam boa ignição. Cerca de 78% do poder calorífico do bagaço é representado pelos materiais voláteis e consomem 74% do ar de combustão (PELLEGRINI, 2002).

4.2.2 A tecnologia de geração de vapor a partir da biomassa

Geradores de vapor ou caldeira são os nomes dados aos equipamentos que tem como função mudar o estado da água do líquido para vapor. Outros fluidos podem ser utilizados para produção de vapor, no entanto, a água é preferida, pois possui elevado calor específico e abundância no meio industrial. Os geradores de vapor são comumente utilizados em processos industriais e na geração de energia elétrica.

No século II a.C., o homem produziu vapor pela primeira vez, através de uma máquina, onde água era aquecida em uma bacia e o vapor produzido movimentava uma esfera em torno do seu próprio eixo. Essa máquina foi construída por Heron de Alexandria e foi antecessora das turbinas a vapor e das caldeiras. Posteriormente, na época da Revolução Industrial, foi que houve a utilização de vapor para movimentar as máquinas (ALTAFINI, 2002).

Na Inglaterra, em 1785 a primeira máquina construída por James Watt (1736-1819) foi ligada a um tear para fabricar tecido. A máquina a vapor adquiria energia da queima do carvão, que liberava o calor utilizado para produzir vapor. Com seu aperfeiçoamento foi possível diminuir seu tamanho e aumentar sua potência. Primeiramente, as máquinas foram usadas como bombas de água, depois passaram a ser usadas na indústria

têxtil e serrarias (EQUIPE EDUCAREDE, 2009). Aproximadamente, 6 mil teares funcionavam a vapor por volta de 1835.

Kinoshita (1991 apud HIGA, 2003) diz que a geração de vapor em usinas de açúcar usando o bagaço, acontece desde o século XIX. No início, o vapor foi utilizado somente para o processo, em substituição ao calor do fogo empregado para concentração do caldo. Posteriormente, começou a ser utilizado em motores a vapor para geração de trabalho mecânico. Os motores a vapor foram abandonados e substituídos por turbinas a vapor.

As caldeiras (geradores de vapor) funcionam como trocadores de calor, ou seja, transferem energia de uma fonte térmica a um fluido (normalmente a água) produzindo vapor. A energia térmica é obtida principalmente pela queima de combustíveis, tais como carvão, lenha, óleos derivados do petróleo, gás natural, e os combustíveis deste estudo: bagaço e palhiço de cana-de-açúcar (SISTEMAS..., 2004).

Pera (1990) descreve uma caldeira de vapor, como um vaso fechado a pressão, contendo tubos onde é adicionada água que se transforma continuamente em vapor por meio da aplicação externa de calor. Ainda de acordo com Pera (1990), há dois tipos fundamentais de caldeiras:

Caldeiras tubos de fumaça (flamotubulares), onde os gases de combustão circulam pelo interior dos tubos, cedendo calor e vaporizando a água que fica por fora dos mesmos.

Caldeiras de tubo de água (aquotubulares), onde os gases de combustão circulam externamente aos tubos, cedendo calor e vaporizando a água contida no interior dos mesmos.

As caldeiras para combustíveis sólidos, como o bagaço e o palhiço, também podem ser classificadas de acordo com o método de combustão: (a) queima em leito fixo (em camada ou pilha, sobre uma grelha); (b) queima em suspensão (o combustível é queimado em todo volume da câmara de combustão); (c) queima em leito fluidizado (o combustível se mantém em suspensão em um leito fluidizado); pode ocorrer também uma combinação dos métodos dependendo do comportamento dinâmico das partículas sujeitas ao fluxo gasosos no interior da câmara de combustão (CORRÊA NETO; RAMON, 2002 e CORTEZ et al., 2008)

Leme (2005) diz que a eficiência da caldeira é influenciada pelo tipo de queima. As mais antigas e menos eficientes são as que usam queima em leito fixo, porém ainda são comuns no setor por terem sido instaladas nas primeiras unidades produtivas. Já as caldeiras com queima em suspensão possuem maior eficiência por serem mais modernas, possibilitando maior capacidade de operação, e têm sido a opção quando da substituição de equipamentos antigos.

A gaseificação do combustível antes da combustão é outra opção para o uso da energia do combustível sólido. A gaseificação transforma qualquer combustível sólido ou líquido em uma mistura de gases energéticos, por meio da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta transformação pode ser realizada em vários tipos de reatores, chamados gaseificadores (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

As caldeiras são constituídas de uma associação de componentes conforme mostra a Figura 1.

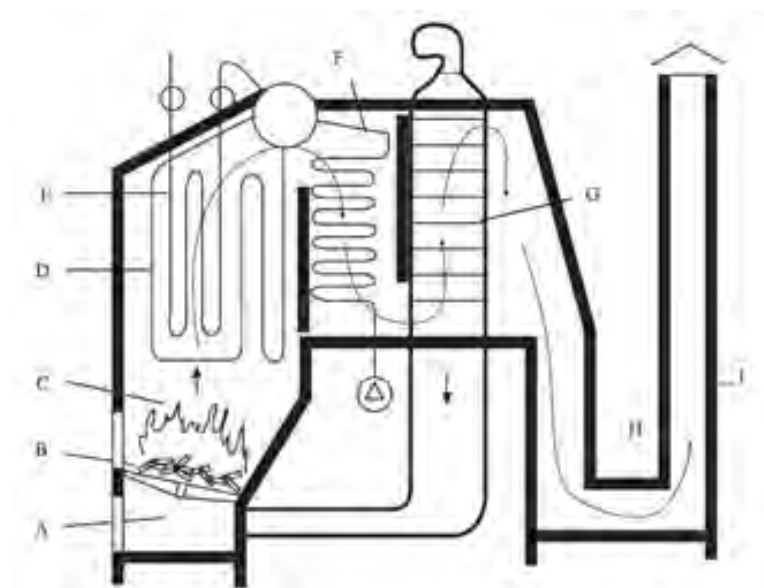


Figura 1 - Componentes de uma caldeira.

Fonte: Pera (1990).

A) Cinzeiro: em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado.

B) Fornalha com grelha ou queimadores de óleo ou gás.

- C) Seção de irradiação: são as paredes da câmara de combustão revestidas internamente por tubos de água.
- D) Seção de convecção: feixe de tubos de água, recebendo calor por convecção forçada; pode ter uma ou mais passagens de gases.
- E) Superaquecedor: trocador de calor que aquecendo o vapor saturado transforma-o em vapor superaquecido.
- F) Economizador: trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira aquecem a água de alimentação.
- G) Pré-aquecedor de ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão também trocando calor com os gases de exaustão da caldeira.
- H) Exaustor: faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases.
- I) Chaminé: lança os gases de combustão ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos.

A caldeira pode ainda ter equipamentos de limpeza dos gases, tais como filtros, ciclones ou precipitadores eletrostáticos para captação de material particulado ou ainda lavadores de gases para captação de gases ácidos: SO_x, NO_x, etc.

Para uso industrial as caldeiras podem ser arbitrariamente divididas de acordo com a pressão de trabalho (BIZZO, 2003): baixa pressão: até 10 kgf.cm⁻²; média pressão: de 11 a 40 kgf.cm⁻²; alta pressão: maior que 40 kgf.cm⁻².

Na indústria sucroalcooleira brasileira é comum encontrar caldeiras operando com pressão média entre 18 e 21 bar e temperatura de 280 a 310 °C. Nesta configuração pode ser gerado excedente de energia elétrica, no entanto em pequena quantidade, fazendo com que a produção média de potência seja praticamente a mesma necessária para consumo da usina. Os sistemas de geração de vapor que são usados tanto como fonte de calor para o processo como para produção de energia excedente para comercialização necessitam de aprimoramento que tem sido realizado por meio do aumento da capacidade de geração, dos níveis de pressão, da temperatura e da eficiência (HIGA, 2003). Para um aumento da geração de potência é necessária a troca de caldeiras de baixa e média pressão por modelos de alta pressão.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009) durante o Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL as usinas instalaram sistemas de vapor, que atualmente estão no fim de sua vida útil. Assim, muitas usinas deverão se reequipar nos próximos anos instalando sistemas mais eficientes que permita a geração de energia elétrica excedente para o Sistema Interligado Nacional. Guimarães (2007) cita o caso da Usina Santa Adélia, em Catanduva (SP) onde houve a substituição de uma caldeira com 21 bar de pressão, por duas com 63 bar. Uma caldeira de 21 bar e temperatura de 300 °C, que atualmente vem sendo substituída pelas usinas, precisa produzir 12,5 kg de vapor para gerar 1 kW de energia elétrica. Uma caldeira operando com 65 bar e 520 °C necessita de apenas 5,7 kg de vapor para gerar 1 kW, pois o vapor sai com maior pressão facilitando a movimentação dos turbogeradores (GUIMARÃES, 2007).

Segundo Dixon (1999 apud HIGA, 2003), o sistema de geração de vapor exige grandes investimentos em uma usina sucroalcooleira, o aumento da capacidade vem sendo realizado comumente pela instalação de novas caldeiras que, no entanto, tem alto custo para as usinas.

De acordo com (CORRÊA NETO; RAMON, 2002), a eficiência dos equipamentos já existentes pode ser aumentada por meio de algumas instalações:

- Superaquecedores: reduzem perdas nos gases de exaustão;
- Desaeradores térmicos: eliminam oxigênio do condensado e outros gases incondensáveis, reduzindo a corrosão e elevando a temperatura da água de alimentação da caldeira;
- Economizadores: recuperam energia dos gases efluentes reduzindo as perdas na chaminé e aumentando a eficiência termodinâmica do ciclo com a elevação da temperatura da água de alimentação da caldeira;
- Pré-aquecedores de ar: recuperam energia dos gases da chaminé;
- Secadores de bagaço: recuperam energia dos gases da chaminé.

Algumas ações de manutenção das caldeiras também podem ser realizadas para aumentar a eficiência (CORRÊA NETO; RAMON, 2002):

- Cuidados com a manipulação do combustível, mantendo-o coberto no pátio, aplicando embebição à quente e rigor na determinação da umidade;

- Tratamento da água das caldeiras, evitando as incrustações provocadas por sais de cálcio e magnésio, sílica, sólidos em suspensão, material orgânico e ferro, o arraste de sílica e sais até os equipamentos de uso final e evitar as purgas desnecessárias;
- Redução de perdas na chaminé da caldeira através de maior controle da combustão e recuperação de energia nos gases de exaustão.

No ciclo a vapor de uma indústria de açúcar e álcool, como demonstrado na Figura 2, o bagaço alimenta a fornalha das caldeiras contendo 50% de umidade. O vapor gerado nas caldeiras possui pressões da ordem de 18 a 21 bar, sendo chamado de vapor primário ou de alta. Esse vapor é usado para o acionamento de turbinas a vapor, que por sua vez acionam equipamentos da indústria, como facas rotativas, os desfibradores, os niveladores, os ternos da moenda, a bomba de água de alimentação da caldeira, os ventiladores de ar de combustão e de gases de exaustão das caldeiras e os geradores de energia elétrica. O vapor de contrapressão (ou de escape) proveniente das turbinas possui pressão mais baixa (entre 2,45 bar e 2,75 bar) e é utilizado para o fornecimento de calor no processo produtivo. Há também o vapor vegetal que é produzido nas etapas de evaporação da água contida no caldo, e também fornece energia na forma de calor para o processo (CORRÊA NETO, 2001 e SOUZA, 2009).

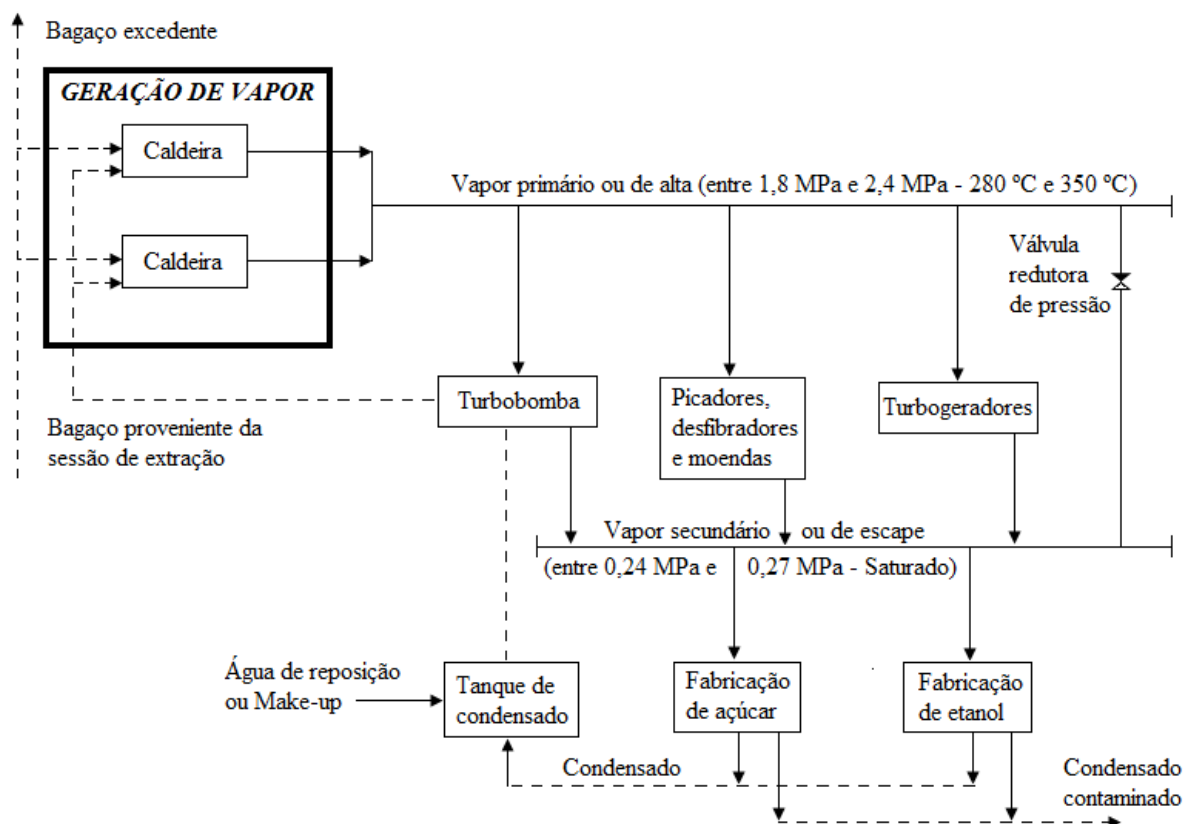


Figura 2 - Esquema do ciclo de cogeração a vapor utilizado nas usinas sucroalcooleiras.
Fonte: Camargo et al. (1990).

Nogueira (2005) comenta que a energia de 1 kg de óleo combustível ou 3 kg de lenha corresponde a 15 kg de vapor. Durante a vaporização e a condensação do vapor há mudanças de fase que originam elevadas variações de volume, e consequentemente elevado coeficiente de transferência térmica que, aliado à elevada densidade energética (calor latente) do vapor, produz elevadas taxas de transferência de calor por unidade de área. Desse modo, o vapor combina baixo preço (dependendo do combustível, de R\$ 20,00 a R\$ 80,00 por tonelada), alta densidade energética ($>2700 \text{ kJ.kg}^{-1}$) e elevada taxa de transferência de energia ($>10.000 \text{ W/m}^2.\text{K}$).

Segundo Corrêa Neto (2001), os ciclos simples a vapor do setor sucroalcooleiro brasileiro, operam com pressões do vapor primário da ordem de 20 bar, enquanto que usinas produtoras de açúcar de outras regiões do mundo o vapor tem pressão de 80 bar, permitindo maior geração de energia elétrica. Os sistemas de geração de vapor

brasileiros foram dimensionados para atender apenas as necessidades energéticas da própria usina, pois não havia possibilidade de exportar e comercializar a energia elétrica excedente.

A Tabela 4 apresenta os principais indicadores técnicos dos sistemas tradicionais.

Tabela 4 - Características técnicas dos ciclos tradicionais de contrapressão.

Temperatura de operação (°C)	280 a 350
Pressão de operação (bar)	20 a 30
Produção de vapor (kg/t _{cana})	350 a 500
Produção de eletricidade (kWh/t _{cana})	15 a 25
Eficiência térmica (%)	20 a 25
Escala até (MW)	25

Fonte: Corrêa Neto (2001).

4.3 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas cultivados no Brasil desde a época da colonização. A produção de cana-de-açúcar desde o início teve como objetivo atender diretamente ao mercado interno e/ou externo do açúcar e do álcool (PELLEGRINI, 2002).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, e possui ciclo médio de 4 anos desde o plantio até a renovação das áreas plantadas. Segundo Paoliello (2006) a cana-de-açúcar faz parte da família Poacea do gênero *Saccharum*, tendo como principais espécies a *officinarum* L., a *spontaneum* L., *sinense* Roxb., Barberi Jesw., *robustum* Jews e *edule* Hask. É comumente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, pois necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo, e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares.

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada desde a época da colonização (1532), e atualmente, ocupa de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2010) 7,4 milhões de hectares do território brasileiro. Há 411 unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia, sendo 249 mistas, 161 que produzem somente álcool e 16 exclusivamente açucareiras (BRASIL, 2010a).

De acordo com Cordeiro (2008), a cana-de-açúcar tem uma fisiologia privilegiada, pois pertence ao grupo de plantas C4, que possuem elevada eficiência fotossintética na transformação de CO₂ (dióxido de carbono) em biomassa. A temperatura adequada juntamente com a grande quantidade de energia solar e de água, forneceram o ambiente ideal para que a cana-de-açúcar se adaptasse no Brasil.

A composição média da cana-de-açúcar é apresentada na Tabela 5, e os seus principais constituintes são mostrados na Tabela 6. A substância mais importante contida na cana-de-açúcar é a sacarose, que é um dissacarídeo formado por uma molécula de glicose e uma de frutose (LANZOTTI, 2000).

Tabela 5 - Composição média da cana-de-açúcar.

Composição	Teor (%)
Água	65 – 75
Açúcares	11 -18
Fibras	8 -14
Sólidos solúveis	12 – 23

Fonte: Copersucar (2010).

Tabela 6 – Principais constituintes da cana-de-açúcar.

Constituintes	Sólidos solúveis (%)
Açúcares	75 a 93
Sacarose	70 a 91
Glicose	2 a 4
Frutose	2 a 4
Sais	3 a 5
De ácidos inorgânicos	1,5 a 4,5
De ácidos orgânicos	1 a 3
Proteínas	0,5 a 0,6
Amido	0,001 a 0,05
Gomas	0,3 a 0,6
Ceras e graxas	0,05 a 0,15
Corantes	3 a 5

Fonte: Copersucar (2010).

A cana-de-açúcar quando moída produz 60 a 75% de suco doce e potável (garapa ou caldo de cana-de-açúcar), rico em açúcares vegetais como glicose e sacarose e sais minerais. O caldo de cana-de-açúcar quando submetido a evaporação produz um melaço ou xarope, que por meio de diferentes tratamentos dá os diversos tipos de açúcar

encontrados no comércio: refinado, cristal, mascavo, demerara, rapadura, etc. A garapa fermentada produz o vinho que através da destilação fornece a aguardente ou álcool combustível, de acordo com a regulação na destilação, além de diversos outros componentes. O líquido que sobra no processo de destilação, chamado de vinhaça, é usado como adubo na própria lavoura de cana-de-açúcar. O bagaço obtido após a moagem dos colmos pode ser usado na fabricação de papel, e as cinzas desse bagaço usadas como adubo potássico-fosfatado (CRISPIM; VIEIRA, 2009)

Segundo Cortez et al. (2008), o açúcar de cana produzido no Brasil representa 8% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola nacional e 35% do PIB agrícola do estado de São Paulo. A cultura de cana-de-açúcar, emprega cerca de 1 milhão de pessoas diretamente, sendo 511 mil apenas na produção da cana-de-açúcar. Na área industrial de açúcar, álcool e outros nichos do setor, distribui-se o restante dos empregos. O estado de São Paulo responde por 60% da colheita brasileira de cana-de-açúcar e por 400 mil empregos direto no setor.

O Brasil é o único país produtor que realiza duas colheitas por ano: uma no Norte-Nordeste, de dezembro a maio, e outra na região Centro-Sul de abril a novembro. Nações como Índia, China, México entre outras são grandes produtoras de cana-de-açúcar e destinam suas colheitas à produção de açúcar. Conforme Anuário...(2008) verifica-se na Figura 3 a situação da cana-de-açúcar no mundo.

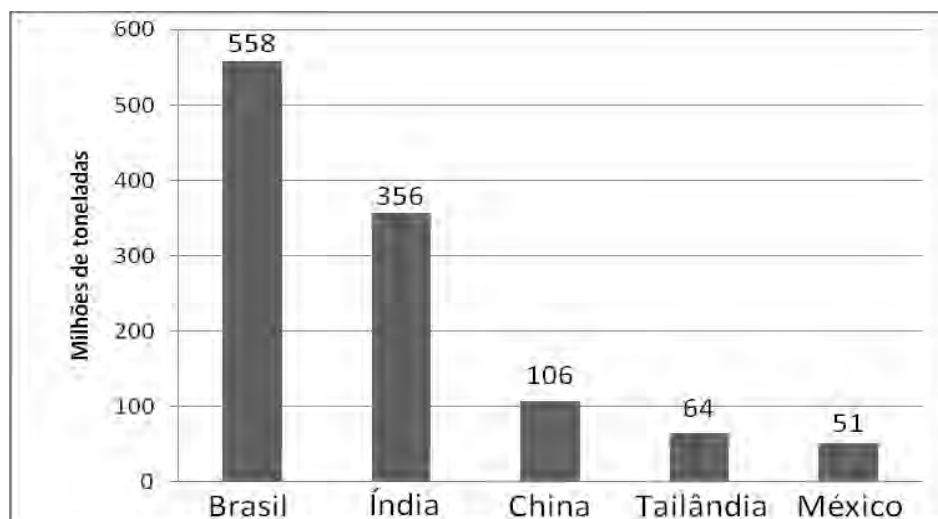


Figura 3 – Produção de cana-de-açúcar no mundo em 2008.

Fonte: Anuário...(2008).

De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2010), no Brasil, a região centro-sul e norte-nordeste são as responsáveis pelo processamento da cana-de-açúcar, conforme se verifica na Figura 4.

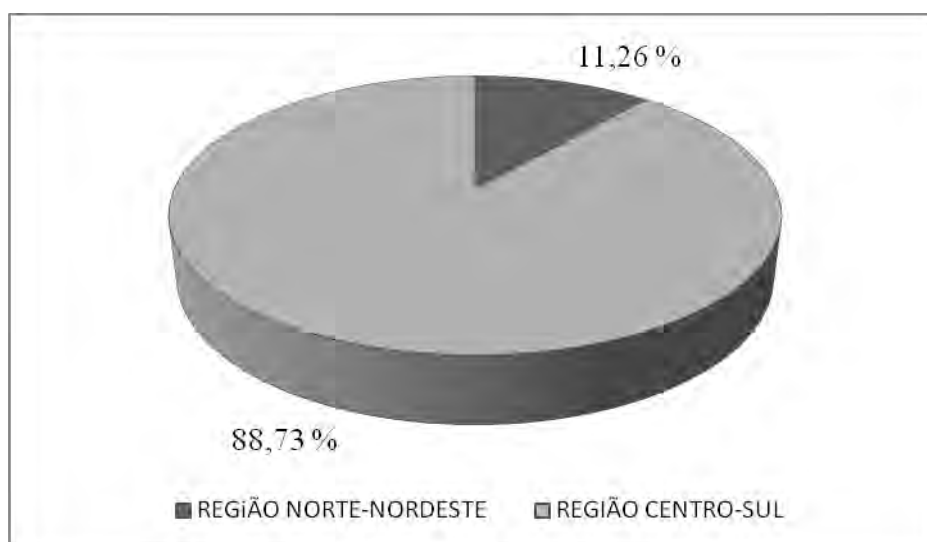


Figura 4 – Cana-de-açúcar processada pelas usinas brasileiras na safra 2008/2009.
Fonte: UNICA (2010).

Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2010), o total dessa matéria-prima, processada pelo setor sucroalcooleiro para a safra 2009/2010 foi de 612,21 milhões de toneladas, 7,1% mais do que a safra passada. Para a safra de 2010/2011 é estimada a moagem de 664,33 milhões de toneladas com incremento de 9,9% em relação a safra 2009/2010, ou seja, a nova colheita terá volume adicional de 59,82 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. O maior produtor de cana-de-açúcar do mundo é o Estado de São Paulo, com aproximadamente 4,4 milhões de hectares de seu território destinados ao plantio dessa cultura, o que representa cerca da metade da área plantada de cana-de-açúcar do país, responsável por 54,35% da produção nacional (384,56 milhões de toneladas).

4.4 Colheita da cana-de-açúcar

4.4.1 Legislação

A queima da palha da cana-de-açúcar possui diversos desdobramentos jurídicos, resultado do enorme dano que provoca ao meio ambiente e a sociedade de maneira em geral. Desde a década de 60, o governo federal vem criando algumas diretrizes para a questão das queimadas no Brasil, as quais estabelecem a prática controlada do fogo em atividades agropastoris ou florestais.

Foi criada no Estado de São Paulo a Lei nº 11.241/02 sobre a eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar de forma gradativa. Esta lei complementou a Lei Estadual nº. 10.547/2000, que dispunha sobre o emprego do fogo como técnica agrícola, revogando seu parágrafo 2º do artigo 1º e os artigos 16 e 17. A Lei nº 11.241/02 foi regulamentada pelo decreto nº 47.700/03, que explicita os comandos da lei para dar-lhe plena execução e entendimento aos órgãos incumbidos de sua aplicação e, também, aos administrados, valendo ressaltar o ganho de qualidade decorrente dos procedimentos por via eletrônica estabelecidos.

A finalidade da lei e seu regulamento é a eliminação total da queima de canaviais em todo o Estado de São Paulo. Todavia, como se julgou inviável fazer isso abruptamente, a lei estabeleceu prazos, considerando os ciclos quinquenais de renovação dos canaviais.

A Lei 11.241/2002 apresenta, em seu artigo 2º, tabelas (Tabela 7 e 8) para a eliminação gradativa do atual processo de cultivo. Segundo este dispositivo, a queima da palha da cana-de-açúcar deverá ser totalmente substituída num período de 30 anos, num prazo que termina em 2031. A partir dessa data, só poderá existir o cultivo mecanizado de cana-de-açúcar crua.

A legislação estadual também distingue as áreas mecanizáveis (plantações em terrenos acima de 150 ha (cento e cinquenta hectares), com declividade igual ou inferior a 12% (doze por cento) das não mecanizáveis (plantações em terrenos com declives

superiores a 12%), determinando a sua redução gradativa de modo que a cada cinco anos deixe de ser queimada 20% da área a ser colhida.

Tabela 7 - Prazos para redução da queima da palha de cana-de-açúcar nas áreas mecanizáveis.

Ano	Área mecanizável onde não pode efetuar a queima da cana-de-açúcar	Percentagem de eliminação
1º ano (2002)	20% da área cortada	20% da queima eliminada
5º ano (2006)	30% da área cortada	30% da queima eliminada
10º ano (2011)	50% da área cortada	50% da queima eliminada
15º ano (2016)	80% da área cortada	80% da queima eliminada
20º ano (2021)	100% da área cortada	Eliminação total da queima

Tabela 8 - Prazos para redução da queima da palha de cana-de-açúcar nas áreas não mecanizáveis.

Ano	Área não mecanizável, com percentagem de eliminação declividade superior a 12% e/ou da queima menor de 150 há	Onde não se pode efetuar a queima
10º ano (2011)	20% da área cortada	10% da queima eliminada
15º ano (2016)	30% da área cortada	20% da queima eliminada
20º ano (2021)	50% da área cortada	30% da queima eliminada
25º ano (2026)	80% da área cortada	50% da queima eliminada
30º ano (2031)	100% da área cortada	100% da queima eliminada

Segundo esta nova legislação, a autoridade ambiental determinará a suspensão da queima quando, constatados e comprovados risco de vida humana, danos ambientais ou condições meteorológicas desfavoráveis, a qualidade do ar atingir índices prejudiciais à saúde humana ou os níveis de fumaça originados da queima, comprometam ou coloquem em risco as operações aeronáuticas, rodoviárias e de outros meios de transporte.

O artigo 4º apresenta os limites máximos de determinadas áreas em que a queimada poderá ser realizada, como por exemplo: I - 1 (um) quilômetro do perímetro da área urbana definida por lei municipal e das reservas e áreas tradicionalmente ocupadas por indígenas; II - 100 (cem) metros do limite das áreas de domínio de subestações de energia elétrica.

O artigo 13º rege que o não cumprimento do disposto nesta lei sujeita o infrator, pessoa física ou jurídica, às sanções e penalidades previstas na legislação.

Nos anos posteriores a 2002, resoluções e portarias foram instituídas:

- a) Resolução SMA - 12, de 11/3/2005: Aprova as Instruções para os procedimentos de requerimento e comunicação prévia de queima controlada da palha da cana-de-açúcar, nos termos da Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, e dos Decretos nº 47.700, de 11 de março de 2003 e 49.391, de 21 de fevereiro de 2005 e dá providências correlatas.
- b) Resolução SMA - 33 de 21/06/2007: Dispõe sobre a aplicação da Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, regulamentada pelo Decreto nº 47.700, de 11 de março de 2003 no atinente à limitação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e dá providências correlatas.
- c) Resolução SMA - 42 de 26/09/2007: Institui o Projeto Estratégico Mata Ciliar e dá providências correlatas.
- d) Portaria CPRN - 2, de 29/01/2008: Define os procedimentos para o atendimento dos artigos 3º e 7º da Resolução SMA 42 de 26/09/2007
- e) Resolução SMA - 44, de 16/06/2009: Dispõe sobre os procedimentos relativos à suspensão da queima da palha de cana-de-açúcar ditados pela Lei Estadual nº 11.241-2002 e Decreto Estadual nº 47.700-2003.

Existem também as leis municipais: Lei Municipal 3.963/05 (Limeira), Lei Municipal 9.721/06 (São José do Rio Preto), Lei Municipal 3.998/07 (Barretos), Lei Municipal 4.504/07 (Americana), que dispõe sobre a proibição da queimada de canaviais localizados no respectivo município e prevê a aplicação de multas, e dá outras providências.

4.4.2 Colheita sem queima prévia – mecanização

Segundo Braunbeck e Cortez (2002 apud LEME, 2005) existem três tipos de colheita de cana-de-açúcar no Brasil: (1) Semimecanizada onde é feita a limpeza do canavial através da queima da cana-de-açúcar, corte manual e carregamento mecanizado, feito por gruas carregadoras; (2) Mecanizada sendo a cana queimada para limpeza do canavial, e o corte e carregamento mecanizados, feitos por colheitadeiras de cana picada; e (3) Mecanizada sendo a cana colhida crua, ou seja, corte, limpeza e carregamento mecanizados, feitos por colheitadeiras de cana picada. Quando é realizada a limpeza do canavial por meio da queima da cana-de-açúcar a colheita da cana-de-açúcar é classificada como colheita de cana queimada,

ao contrario, quando não se faz a queima do canavial, a colheita é classificada em colheita de cana-de-açúcar crua ou verde. Para que o corte manual seja realizado é imprescindível que a cana-de-açúcar seja previamente queimada, pois, a não queima acarreta em diminuição da produtividade da colheita e aumento do risco de acidentes de trabalho em virtude das folhas da cana, que são cortantes, e de insetos e animais peçonhentos que normalmente se abrigam no canavial.

O avanço tecnológico permitirá que a maior parte da colheita da cana-de-açúcar seja feita por meio de máquinas. A colheita mecanizada pode ser economicamente interessante, visto que, há um melhor controle das atividades de corte combinada com o ritmo de trabalho da indústria. Há também como vantagem da colheita mecanizada uma padronização, pré-processamento da matéria prima e maior segurança no processo produtivo, sendo que os problemas ambientais podem ser minimizados pela não queima da cana-de-açúcar (TOLENTINO, 2007). Outro fator para implantação da colheita mecânica citado por Ustulin e Severo (2001) deve-se a disponibilidade da mão-de-obra, sendo que a um trabalhador braçal colhe, em média, 6 toneladas de cana-de-açúcar por dia, a máquina pode atingir até 600 toneladas por dia.

As queimadas apenas reduzem os custos do setor sucro-alcooleiro com a colheita da cana-de-açúcar, pois o rendimento, seja do trabalhador ou da colheitadeira, é triplicado quando a palha é queimada. Hoje, especialmente no estado de São Paulo, aproximadamente 40% das lavouras brasileiras é colhida por máquinas. Embora mecanizar a colheita exija um considerável investimento inicial, a eficiência dos resultados é maior, e também, há a contribuição ambiental, já que elimina a necessidade de queimar as plantações.

No entanto, significa a substituição diretamente de até cem trabalhadores por colhedora. Sabe-se que com o uso de máquinas, aumenta-se em muito a produção, pois um trabalhador braçal colhe em média 7 toneladas por dia, enquanto que a máquina colhedora tem capacidade para atingir 800 toneladas por dia ou até mais (ROCHA, 2007).

Mecanicamente, quando a cana crua é colhida, o custo do corte, do carregamento e do transporte (CCT) é em média 25% menor e cerca de 37% menor quando a cana queimada é colhida mecanicamente, em relação ao corte manual.

Essa substituição contribui por outro lado, para o aumento do número de desempregados e conseqüentemente diminui a qualidade social do País e tem sido o motivo de movimentos sociais preocupados com o impacto dessa mão-de-obra sem trabalho na sociedade.

As usinas estão com dificuldades para encontrar mão-de-obra qualificada para o corte manual da cana-de-açúcar. Tanto a escassez de mão-de-obra como o aumento de seu custo, levam as usinas a substituir trabalho humano pelo trabalho mecanizado (ROCHA, 2007).

A mecanização da colheita não busca apenas a redução de custos, mas também atender à legislação e, principalmente, uma solução estratégica para a escassez de mão-de-obra.

Para Lanzotti (2000) a queima da cana-de-açúcar tem como vantagem facilitar e baratear o corte manual e reduzir os custos de carregamento e de transporte. Facilita também o acesso ao canavial por parte dos cortadores, os protegendo. Na usina ocorre um aumento da eficiência da moenda, que não necessita parar seu funcionamento para retirada do palhiço. Porém há também desvantagens da queima da cana-de-açúcar pré colheita, como a perda da energia que o palhiço contém; compactação do solo devido ao aumento da temperatura e diminuição da umidade; emissão de poluentes na atmosfera, afetando as áreas rurais adjacentes e os centros urbanos mais próximos e gerando grande impacto no ambiente e na saúde humana; aumento da sujeira doméstica e do consumo de água tratada; dano às redes de transmissão de energia, causando eventuais interrupções no fornecimento de energia elétrica; aumento de acidentes automobilísticos, já que a fumaça diminui a visibilidade dos motoristas.

De acordo com Paoliello (2006), países importadores impõe inúmeras barreiras aos produtos obtidos, sem que sejam observadas condutas ambientalmente aceitáveis, portanto, a suspensão da queima da cana-de-açúcar e implantação sistema de corte de cana-de-açúcar crua esta ocorrendo não apenas pela existência de dispositivos legais ou ações movidas pelo ministério público, através das curadorias de meio ambiente, mas, principalmente, por exigência mercadológica.

Segundo Braunbeck e Magalhães (2010) atualmente, a mecanização total ou parcial da colheita da cana-de-açúcar é a melhor alternativa tanto do ponto de vista

ergonômico quanto econômico e, principalmente, do ponto de vista legal e ambiental, visto que, o corte mecânico da cana crua disponibiliza o palhiço para ser aproveitado. No caso dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar queimada, tanto para o corte manual como para o mecanizado, apenas os colmos são aproveitados, sendo realizado o corte da base, do ponteiro e a picagem ou empilhamento dos colmos. O palhiço não é usado e por isso é separado total ou parcialmente dos colmos e fica no campo para posterior recolhimento.

Para alimentar as caldeiras de vapor, o desenvolvimento da cogeração energética exigirá um maior volume de palhiço, o que transformará a venda ou utilização do palhiço deixado no campo pela colhedora numa atividade rentável, podendo diminuir os custos da mecanização da colheita e gerar considerável número de postos de trabalho para a retirada de palhiço do campo.

O palhiço, o ponteiro e o bagaço da cana-de-açúcar servirão futuramente para aumentar o calor necessário na geração de energia das usinas. A matéria seca deixada no campo com a colheita da cana verde, quando levada para ser queimada nas usinas, pode aumentar o poder calorífico da caldeira em cerca de 20%. O sistema é baseado na palha e o ponteiro, que geralmente ficam no campo, estes seriam levados juntamente com a cana a para a usina onde, antes da moagem, sofreriam uma limpeza à seco, sendo compactados para armazenamento e utilização na queima com ao bagaço ou na época de entressafra de cana-de-açúcar.

A colheita mecanizada com a realização da limpeza da palha à seco na esteira da usina tornaria mais simples o trabalho das colhedoras nos aspectos de campo. Todo o conjunto de equipamentos utilizados pela colhedora para a limpeza de campo seria extinto. Sem o uso de exaustores, ventiladores, cortadores de pontas e partes dos sistemas hidráulicos, o equipamento se tornaria simplificado e barato, dando mais leveza e eficiência à colhedora, reduzindo ainda os gastos com manutenção e reposição de peças (USTULIN e SEVERO, 2001).

A característica marcante do sistema de colheita de cana crua é a grande quantidade de resíduos (palhiço), restantes sobre o solo após a colheita. Existe diversos benefícios do palhiço deixado no campo, segundo Hassuani et al. (2005): proteção do solo contra a erosão, menor temperatura do solo devido a proteção da radiação solar, aumento da atividade biológica do solo, maior taxa de infiltração de água no solo, redução da evaporação e

consequente aumento na disponibilidade de água, controle de plantas daninhas e redução e/ou eliminação do uso de herbicidas. Ainda de acordo com Hassuani et al. (2005) há também alguns problemas relacionados à presença do palhiço no campo: riscos de incêndio durante e após a colheita, problemas na realização do cultivo e adubação das soqueiras, retardamento ou falhas na brotação causando redução da produtividade quando a temperatura do solo é baixa e/ou a umidade é alta, elevação da população de pragas devido ao cobertor de palhiço, onde elas se abrigam e se multiplicam.

4.5 A cogeração de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro

4.5.1 Disponibilidade de biomassa residual de cana-de-açúcar

De acordo com Corrêa Neto (2001), o colmo, as folhas e os ponteiros fazem parte da cana-de-açúcar no campo no estágio de colheita, sendo o colmo a matéria prima principal usada na fabricação de açúcar e álcool. O bagaço (biomassa constituída de fibras) é obtido após a moagem do colmo da cana-de-açúcar para obtenção do caldo. Atualmente, a maior parte do bagaço é queimada em caldeiras para produção de vapor, porém, durante muito tempo, foi considerado como resíduo.

Durante o crescimento da cana-de-açúcar, crescem também as folhas e as pontas, que sempre foram descartadas (através da queima pré colheita), pois não se vislumbrava sua utilidade. Atualmente, a queima da cana-de-açúcar antes do corte vem sendo abolida e substituída pela colheita mecanizada. Ripoli e Ripoli (2009) dizem que o material remanescente sobre a superfície do talhão, após a colheita mecanizada, constituído de folhas verdes, palha, ponteiros e/ou suas frações; frações de colmos (industrializáveis ou não); eventualmente frações de raízes e partículas de terra a eles aderida, é denominado palhiço.

Assim, de acordo com Corrêa Neto (2001), a cana-de-açúcar tem disponível dois tipos de biomassa: o bagaço de cana-de-açúcar, subproduto do processo de moagem, disponível na usina e comumente usado como insumo energético e o palhiço, material remanescente da colheita da cana-de-açúcar sem queimar, que fica no campo e

necessita ser recolhido e transportado até a usina para possibilidade de uso como insumo energético.

De acordo com Walter (1993), o teor de fibra é determinante da quantidade de bagaço obtido por unidade de massa. O bagaço excedente em usinas da região sudeste pode ser calculado utilizando um teor de fibra de 12,5% a 13%, o que corresponde a 250 ou 260 kg de bagaço, com 50% de umidade, por tonelada de cana-de-açúcar.

A relação entre a quantidade de bagaço e a produtividade da cana-de-açúcar pode ser estabelecida pela variedade da cana-de-açúcar e sua proporção de fibras de acordo com a equação 1 (CORRÊA NETO, 2001):

$$Q_b = \frac{P_c \cdot F_c}{(1 - U_b)} \quad (1)$$

Onde:

Q_b = quantidade de bagaço produzida, t

P_c = produtividade da cana-de-açúcar, t

F_c = teor de fibra da cana-de-açúcar, $t_{\text{fibra}}/t_{\text{cana}}$, %

U_b = teor de umidade do bagaço, $t_{\text{água}}/t_{\text{bagaço úmido}}$, %

Dependendo da variedade da cana-de-açúcar, o teor de fibra pode variar entre 13% e 16% gerando uma quantidade de bagaço entre 130 $\text{kg}_{\text{bagaço}}/t_{\text{cana}}$ e 160 $\text{kg}_{\text{bagaço}}/t_{\text{cana}}$, em base seca e, entre 260 $\text{kg}_{\text{bagaço}}/t_{\text{cana}}$ e 320 $\text{kg}_{\text{bagaço}}/t_{\text{cana}}$, com 50% de umidade (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

Paoliello (2006) acredita que o bagaço é um dos resíduos sólidos de maior significância em termos de quantidade (250 a 260 kg por tonelada de cana-de-açúcar) e por isso necessita de grandes áreas para o seu armazenamento. Sendo o bagaço obtido na média de 250 kg (com 50% de umidade) por tonelada de cana-de-açúcar esmagada, Ripoli (2005) estima uma quantidade média 11,25 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (base peso seco e para canaviais com produtividade 90 t de cana-de-açúcar por hectare)

A Figura 5 mostra a evolução na produção de bagaço no Brasil nos últimos 20 anos.

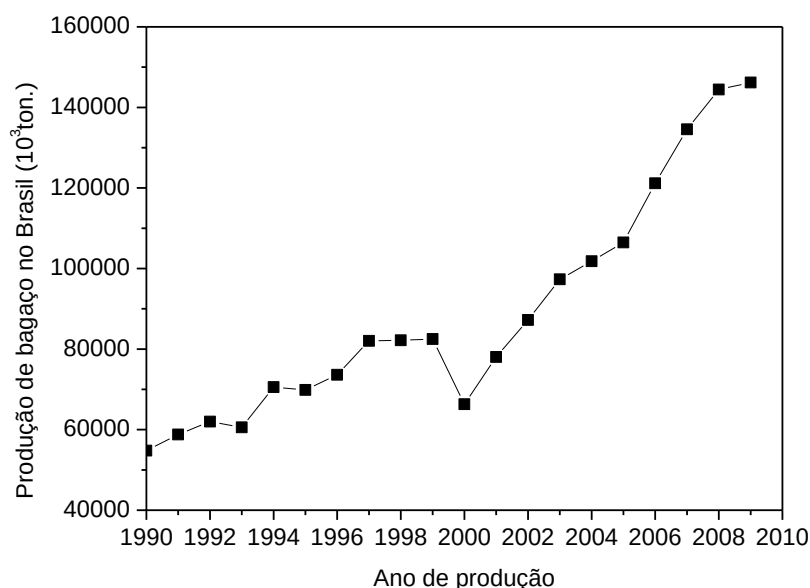


Figura 5 – Evolução da produção de bagaço no Brasil de 1990 até 2009.
Elaborado a partir de BRASIL (2010b).

Em relação ao palhiço, é observado que diversos trabalhos têm mostrado valores variados de sua quantidade. Para Corrêa Neto (2001), a disponibilidade de palhiço varia em função da variedade da planta cultivada, da idade da cultura, do estágio de corte, da situação climática, do tipo de colheita (cana-de-açúcar queimada ou sem queimar, manual ou mecanizada), da altura de corte dos ponteiros, entre outros. Deve ser considerado que para uso do palhiço para fins energéticos é necessária disponibilidade contínua deste resíduo, portanto em períodos fora da safra o palhiço deverá ser armazenado. Para Torrezan (2003), a variabilidade da quantidade de palhiço se deve também a diferenças nas metodologias adotadas para o recolhimento do palhiço no campo e ao intervalo de tempo entre a colheita da cana-de-açúcar e o recolhimento das amostras.

De acordo com Ripoli (2001), o palhiço que fica no campo após a colheita mecânica pode ser encontrado na ordem de 9 a 28 t.ha⁻¹ dependendo das condições da cultura.

Trabalho de Abramo Filho et al. (1993) sobre os resíduos da colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua mostraram que uma média de 21,3 t.ha⁻¹ de palhiço úmido

foi deixado no campo. Em relação ao palhiço com base em matéria seca foi encontrado 15,1 t.ha⁻¹.

Franco (2003) estudou o desempenho operacional dos equipamentos utilizados em um sistema de enleiramento e recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar à granel. A produtividade foi calculada pela somatória do palhiço remanescente sobre o solo e o palhiço recolhido pela recolhadora de forragens, sendo encontrada uma média de palhiço úmido na área experimental, de 24,13 t.ha⁻¹.

Molina Jr. et al. (1995) encontraram, para a variedade SP70-6163, uma massa de resíduo úmido no campo de 12,55 t.ha⁻¹, e 9,52 t.ha⁻¹ para o palhiço seco.

De acordo com Sartori (2001), a disponibilidade de palhiço é variável para as diferentes variedades de cana-de-açúcar e diferentes números de corte. A mesma ainda determinou a produtividade de palhiço para 5 variedades de cana-de-açúcar em 4 estágios de corte, onde verificou uma variação de 20,53 a 29,76 t.ha⁻¹ no 1º corte, 34,72 a 49,29 t.ha⁻¹ no 2º corte, 18,47 a 29,92 t.ha⁻¹ no 3º corte e 8,82 a 17,04 t.ha⁻¹ no 4º corte. Uma média geral para todas as variedades e números de corte foi de 25,12 t.ha⁻¹.

Furlani Neto et al. (1997) estimaram a quantidade média de palhiço remanescente após a colheita mecânica em canaviais com cana-de-açúcar queimada (13,51 t.ha⁻¹ para SP71-1406; 8,09 t.ha⁻¹ para SP71-6163) e sem queima prévia (24,32 t.ha⁻¹ para SP71-1406; 10,25 t.ha⁻¹ para SP71-6163).

Segundo Tolentino et al. (2007), em seus estudos sobre técnicas matemáticas para o aproveitamento do palhiço com menor custo, a quantidade desse material úmido que fica no campo após a colheita mecânica é: 23,73 t.ha⁻¹ (RB72-454), 21,00 t.ha⁻¹ (RB 80-6043), 26,90 (RB85-5536), 24,10 (SP79-1011), 29,90 (RB85-5113) com média de 25,13 t.ha⁻¹.

Ripoli (2002) realizou, através de técnicas de agricultura de precisão, o mapeamento do palhiço enfardado. A massa do palhiço mostrou-se bastante variável (4,74 a 14,56 t.ha⁻¹) com média de 8,79 t.ha⁻¹ e segundo o autor este fato mostra que é necessário cuidados nas amostragens e determinação da produtividade deste material.

Em estudo realizado por Hassuani et al. (2005), o palhiço foi estimado antes da colheita da cana-de-açúcar, com a finalidade de excluir qualquer interferência da

colheita na quantidade de biomassa. As determinações foram feitas para 3 variedades de cana-de-açúcar e 3 estágios de corte. A Tabela 9 mostra os resultados.

Tabela 9 – Estimativa da disponibilidade de palhiço da cana-de-açúcar (base seca).

Variedade	Estágio de corte	Produtividade dos colmos (t.ha ⁻¹)	Palhiço* (t.ha ⁻¹)	Relação Palhiço/Colmos
SP79-1011	1º Corte	120	17,8	15%
	2º Corte	92	15,0	16%
	3º Corte	84	13,7	16%
SP80-1842	1º Corte	136	14,6	11%
	2º Corte	101	12,6	13%
	3º Corte	92	10,5	11%
RB72-454	1º Corte	134	17,2	13%
	2º Corte	100	14,9	15%
	3º Corte	78	13,6	17%
Média		104	14,4	14%

* Matéria seca

Fonte: Hassuani et al. (2005).

De acordo com o coeficiente de resíduo mínimo (11%) e máximo (17%) é possível verificar que a quantidade de palhiço pode variar de 110 kg_{palhiço}/t_{cana} a 170 kg_{palhiço}/t_{cana}, sendo a média 140 kg_{palhiço}/t_{cana}. Esses valores foram obtidos em matéria seca durante as safras de 1997/1998 e 1998/1999 e, segundo Hassuani et al. (2005), mesmo o Brasil possuindo grande número de variedades de cana-de-açúcar, as desse trabalho são suficientes para representar as diversas áreas onde a cana-de-açúcar é cultivada.

Walter (1993) considera que para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida é possível obter 250 kg de resíduos na forma pontas e folhas.

Paoliello (2006) mostra dados da safra de 2006/2007 obtidos da Agência Ambiental de Araçatuba (CETESB), onde no estado de São Paulo o total de resíduos de palha é de 39 milhões de toneladas, sendo 12 milhões de toneladas deixados na lavoura e 27 milhões a quantidade de palha queimada antes da colheita.

Torrezan (2003) avaliou alguns parâmetros de desempenho para a retirada do campo do palhiço de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, sem queima prévia, através de operações de enleiramento e enfardamento prismático. Obteve como resultado de

produtividade 27 t.ha⁻¹, sendo a composição do palhiço de 68,93% de folhas, 21,44% de colmos, 2,27% de ponteiros e 6,36% de matérias estranhas totais.

Ripoli et al. (1990) obteve a quantidade dos constituintes do palhiço, em três variedades de cana-de-açúcar recém colhidas, e de corte manual na região de Ribeirão Preto –SP. Em outro trabalho, o mesmo pesquisador estimou a quantidade dos constituintes do palhiço de cana-de-açúcar em duas variedades distintas na região de Piracicaba, considerando, a cana-de-açúcar crua e queimada. Os resultados destes trabalhos estão na Tabela 10 e mostram a influência da variedade na produtividade do palhiço (RIPOLI, 1991).

Tabela 10 – Quantidade dos constituintes do palhiço para cana-de-açúcar crua e queimada em diferentes variedades.

	SP71-1406 ¹ (t.ha ⁻¹)		SP71-6163 ¹ (t.ha ⁻¹)		SP70-1284 ² (%)	SP70-6163 ² (%)	SP70-1143 ² (%)
	Crua	Queimada	Crua	Queimada	Corte manual	Corte manual	Corte manual
Ponteiros	8,02	5,91	5,07	6,86	27,63	31,17	24,38
Folhas verdes	16,87	10,26	12,64	10,50	33,91	37,12	40,36
Palhas	8,36	0,33	8,64	0,28	38,46	31,71	35,26
Índice de palhiço (%)	25,00	15,00	28,00	16,00	17,00	31,00	25,00

Fonte: (1) Ripoli (1991); (2) Ripoli et al. (1990)

Para as variedades RB72-454, SP80-1842 e RB78-5148 Ripoli et al. (1997) obtiveram, em termos de produtividades, os seguintes resultados: 100,3 t.ha⁻¹ de colmos industrializáveis; 10,82 t.ha⁻¹ de palhas; 8,18 t.ha⁻¹ de folhas verdes; 7,52 t.ha⁻¹ de ponteiros e índice de palhiço médio de 27,45%.

4.5.2 Utilização do bagaço como fonte de energia

Segundo Schmidt (2008), as usinas iniciaram o uso do bagaço como combustível para substituir a lenha nas caldeiras.

Inicialmente, o bagaço era considerado um resíduo industrial, sendo queimado nas próprias usinas para geração de calor, porém com a principal finalidade de

evitar os transtornos que trazia para indústria. Posteriormente, devido as crises do petróleo e para diminuir os custos de produção no setor sucroalcooleiro, o bagaço começou a ser usado como subproduto, especialmente como insumo energético. O bagaço tem uma composição que depende da variedade da cana-de-açúcar, do método de colheita e da eficiência das moendas da fábrica. Sua constituição é de fibra ou celulose, água, açúcares e impurezas, e sua umidade encontra-se geralmente em torno de 40 – 50% de umidade.

Schmidt (2008) diz que é possível a geração de energia elétrica por meio da queima do bagaço devido a grande quantidade de cana-de-açúcar moída para produção de açúcar e álcool, ou seja, cerca de 30% de bagaço em relação a quantidade de cana-de-açúcar, com 50% de umidade e Poder Calorífico médio de $7,74 \text{ MJ.kg}^{-1}$. O mesmo autor comenta que o potencial energético (poder calorífico) do bagaço depende do seu grau de umidade e do teor de açúcar residual. No entanto o teor de açúcar é comumente baixo, tornando a umidade como determinante do poder calorífico.

Segundo Pellegrini (2002), a utilização do bagaço como combustível permite que as usinas sucroalcooleira sejam auto suficientes em energia térmica e elétrica, o que não é comum acontecer em outros ramos industriais. O bagaço de cana-de-açúcar possui diversas vantagens que o tornam uma das biomassas com melhores atributos econômicos para ser industrializado e concorrer comercialmente com o óleo combustível. As seguintes vantagens podem ser citadas: (a) a cana-de-açúcar possui lavoura organizada e os custos da produção do bagaço são debitados no produto nobre: açúcar e/ou álcool; (b) todo sistema de transporte campo-indústria é organizado e ocorre por conta do mesmo produto nobre; (c) produz grandes quantidades de bagaço, concentradas em um ponto, que o libera semi beneficiado, após o processo de moagem da cana-de-açúcar.

De acordo com Paoliello (2006), o bagaço como combustível apresenta as seguintes características: (a) produção de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar processada: 250 a 260 kg.t^{-1} ; (b) energia útil contida no vapor gerado: $4,79 \text{ MJ.kg}^{-1}$ de bagaço; (c) produção de vapor por kg de bagaço: 1,9 kg vapor por kg de bagaço; (d) poder calorífico inferior (bagaço úmido): $7,53 \text{ MJ.kg}^{-1}$; (e) poder calorífico inferior (bagaço após secagem): $10,56 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Embora possua as vantagens citadas anteriormente, o bagaço tem também alguns inconvenientes para sua utilização como alternativa energética: se estocado

por longo tempo se decompõe; possui baixa densidade quando “in natura” e devido a sua umidade (~50%) tem eficiência de queima reduzida em relação ao óleo combustível, causando redução da eficiência térmica das caldeiras que usam bagaço.

Paoliello (2006) cita um estudo da CETESB mostrando que os problemas para uso do bagaço como alternativa energética poderiam ser eliminados, por meio da prensagem, fermentação natural e aeração, num prazo de 20 dias, a baixo custo. Dessa forma se alcançaria 20% de umidade no bagaço e densidade energética seis vezes superior, facilitando o armazenamento e transporte do bagaço em distâncias de até 200 km da fonte produtora. Assim, de acordo com o estudo da CETESB a queima ocorre de forma mais adequada do que com o bagaço úmido e quase com mesma facilidade do o óleo combustível, aumentando o rendimento térmico das caldeiras que pode atingir valores da ordem de 85%.

Segundo Corrêa Neto e Ramon (2002), em relação a disponibilidade do bagaço, é importante considerar a armazenagem do produto quando a intenção é a geração de energia para venda, especialmente no período fora da safra. A cana-de-açúcar é uma cultura sazonal, portanto na indústria sucroalcooleira o bagaço não é continuamente fornecido, exigindo que estoques sejam formados para suprir a necessidade na entressafra.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Ministério de Minas e Energia, estimou que o potencial de geração de energia com o uso de bagaço é de 25 mil GWh (GWh, unidade de medida para geração e consumo de energia) ao ano, sendo que este potencial equivale 5,4% dos 461.029 GWh gerados em 2006 por todas as fontes energéticas do País - hidroelétricas, termoelétricas, usinas nucleares, etc. Este cálculo efetuado pela EPE utilizou os números de 2006 (430 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada), considerando que as usinas adotassem as tecnologias mais eficientes. Assim, foi possível concluir que em 2030 o País poderá gerar até 39 mil GWh usando bagaço e palha de cana-de-açúcar (SIMÕES, 2008).

Couto et al. (2004) afirmam que o bagaço é um combustível relativamente interessante por apresentar poder calorífico inferior em torno de $7,40 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a um teor de umidade de 50% na base seca. Já para Nagaoka (2002), o bagaço possui poder calorífico por volta de $8,37 \text{ MJ.kg}^{-1}$, não sendo considerado um combustível de elevado poder calorífico, devido ao seu alto teor de umidade. Contudo, se a usina não tem outro

aproveitamento para essa biomassa, esta pode ser usada como combustível, pois sua remoção tem custo elevado.

Segundo Vian (2009), uma quantidade de energia igual a $18,62 \text{ MJ.kg}^{-1}$ pode ser obtida com a queima do bagaço para geração de eletricidade.

Leite e Pinto (1983 apud GERMEK, 2005) mostram que o bagaço com 50% de umidade possui poder calorífico inferior de $7,49 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e a 20% de umidade o poder calorífico inferior sobe para $13,57 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Na Tabela 11 constam valores de poder calorífico superior do bagaço obtidos por Oliveira (1982 apud RIPOLI, 2004) e Peres (1982 apud RIPOLI, 2004) em diferentes países.

Tabela 11 - Poderes caloríficos superiores do bagaço de diversos países.

Países	PCS (MJ.kg^{-1})	
	Oliveira (1982)	Peres (1982)
Austrália	19,00	-----
Brasil	19,25	17,91
Cuba	19,63	18,54
México	-----	21,22
Peru	-----	19,45
Porto Rico	19,22	19,47
Estados Unidos	-----	18,99

Fonte: Oliveira (1982) e Peres (1982).

Silva e Morais (2008) realizaram uma análise energética do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes graus de umidade e encontraram os poderes caloríficos mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Poder calorífico superior do bagaço em função do teor de umidade.

Poder calorífico superior (MJ.kg^{-1})	Umidade (%)
18,24	0
16,67	10
15,23	20
13,16	30
9,52	50

Fonte: Silva e Morais (2008).

Na moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar são produzidos, em média, 250 kg de bagaço como subproduto e 1 MWh de energia é produzida, por meio do sistema de cogeração, com a queima de, aproximadamente, 6,5 toneladas de bagaço (EID et al., 1998).

Ripoli et al. (2000) realizaram um estudo a respeito do potencial energético da biomassa de cana-de-açúcar no Brasil e citam que o bagaço possui um poder calorífico superior de $18,32 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

4.5.3 Utilização do palhiço como fonte de energia

Outro subproduto da cana-de-açúcar que pode ser incorporado à queima do bagaço é o palhiço. Para que o palhiço possa ser aproveitado na produção de energia, o mesmo tem que ser retirado do campo e levado até as caldeiras da usina. Atualmente, existem, 3 alternativas estudadas para o recolhimento do palhiço no campo:

1) Sistema de colheita integral: Neste sistema a cana-de-açúcar é colhida sem queima prévia com os sistemas de limpeza das máquinas desligados. O palhiço e a cana-de-açúcar são juntamente transportados por veículos tradicionalmente utilizados pelo setor, pois nesse caso não há alteração na função do veículo, apenas ocorre o aumento no volume da carga.

O próximo passo é separar o palhiço da cana-de-açúcar. Uma das formas é através de uma estação de limpeza a seco desenvolvida pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) de Piracicaba (TAUBE, 2010). Nesse sistema a limpeza da cana-de-açúcar é realizada por meio de uma forte corrente de ar que separa os colmos do palhiço sem o uso de água. Segundo Germek (2005), o palhiço contém particulados de diferentes tamanhos e formas que causam redução na eficiência da combustão pela possibilidade de obstrução do sistema de alimentação das caldeiras. Uma solução para este problema seria a picagem do palhiço antes de enviá-lo para as caldeiras. No Grupo Equipav, com sede em Promissão, SP, o equipamento para limpeza de cana-de-açúcar a seco é usado desde 2008 e, após a separação, o palhiço passa por uma peneira rotativa que separa toda terra, que é devolvida a lavoura; posteriormente o

palhiço segue para um triturador para ser reduzido e, então, é adicionado nas esteiras que estão transportando o bagaço da cana-de-açúcar para ser queimado na caldeira (TAUBE, 2010).

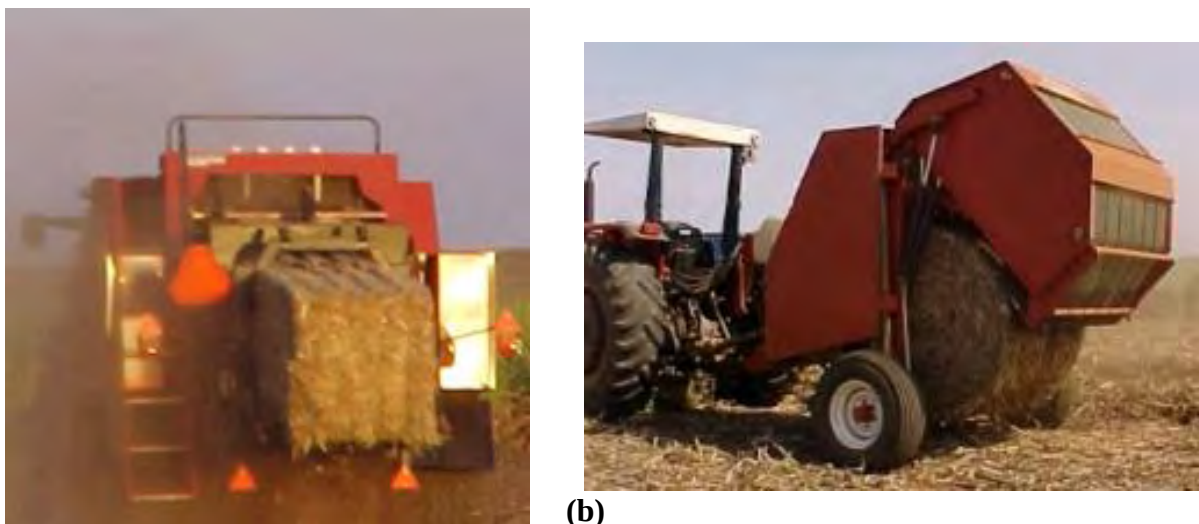
2) Recolhimento a granel: Nesta forma de recolhimento do palhiço, o mesmo é totalmente separado da cana-de-açúcar no momento da colheita, que é realizada mecanicamente com os sistemas de limpeza das máquinas ligados. O palhiço que fica no campo é enleirado e transportado até a usina, a granel, em veículos tipo “gaiola” adequadamente construídos para esta finalidade (GERMEK, 2005). Uma possibilidade que vem sendo analisada é o recolhimento, após o enleiramento, por meio de colhedora picadora de forragem (Figura 6) para diminuir o tamanho das partículas que poderiam causar problemas nos alimentadores de bagaço das caldeiras.



Figura 6 - Recolhedora de forragens recolhendo o palhiço enleirado.
Fonte: Revista Ideanews (2002).

De acordo com Germek (2005), para descarregar este material no pátio da usina é necessário utilizar pá carregadora, equipamento este que já faz parte da infraestrutura da usina pois é usado também para o manuseio do bagaço.

3) Enfardamento: Neste sistema, assim como no anterior, a cana-de-açúcar é colhida sem queima prévia e o palhiço é deixado no campo. O palhiço é enleirado por meio de ancinho enleirador e enfardado, formando fardos prismáticos (Figura 7(a)) ou cilíndricos (Figura 7(b)).



(a)

(b)

Figura 7 – (a) Enfardamento prismático, (b) enfardamento cilíndrico.

Foto: Tomas Caetano Ripoli.

Fonte: Vian (2009).

Estes fardos são colocados em caminhões através de garras carregadoras e transportados para usina, onde são descarregados com a pá carregadora já existente no pátio.

Para que se possa alimentar as caldeiras com o palhiço, os fardos devem ser desmontados e o palhiço desfibrado, operações estas que necessitam de equipamentos especiais (GERMEK, 2005).

Antes do processo de moagem, a cana-de-açúcar passa por um triturador/desfibrador de colmos, sendo essa uma opção para diminuir o tamanho do palhiço, ou seja, misturar o mesmo na esteira de cana-de-açúcar fazendo-o passar pelo triturador/desfibrador. No entanto a capacidade de moagem da cana-de-açúcar é diretamente afetada pelo teor de fibra, que seria aumentada com a adição do palhiço, além da perda de extração do açúcar contido na cana-de-açúcar.

A Figura 8 mostra um fluxograma das opções de recolhimento existentes hoje no Brasil, de acordo com Ripoli e Ripoli (2009).

De acordo com Franco (2003), para realização de estudos sobre sistemas de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar é necessário a caracterização física

dessa biomassa, deve-se quantificar o palhiço recolhido bem como determinar a quantidade de terra agregada ao material recolhido e o custo total do sistema de recolhimento.

Aguilar et al. (1989) realizaram uma pesquisa em Cuba com resíduos de cana-de-açúcar colhida sem queima prévia com o objetivo de usá-los para fins energéticos. Os resultados obtidos para os resíduos de cana-de-açúcar foram comparados com os do bagaço, sendo encontrados 33,78% de umidade e $19,97 \text{ MJ.kg}^{-1}$ de poder calorífico superior para os resíduos enquanto que para o bagaço foram encontrados 47,98% de umidade e poder calorífico de $20,51 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

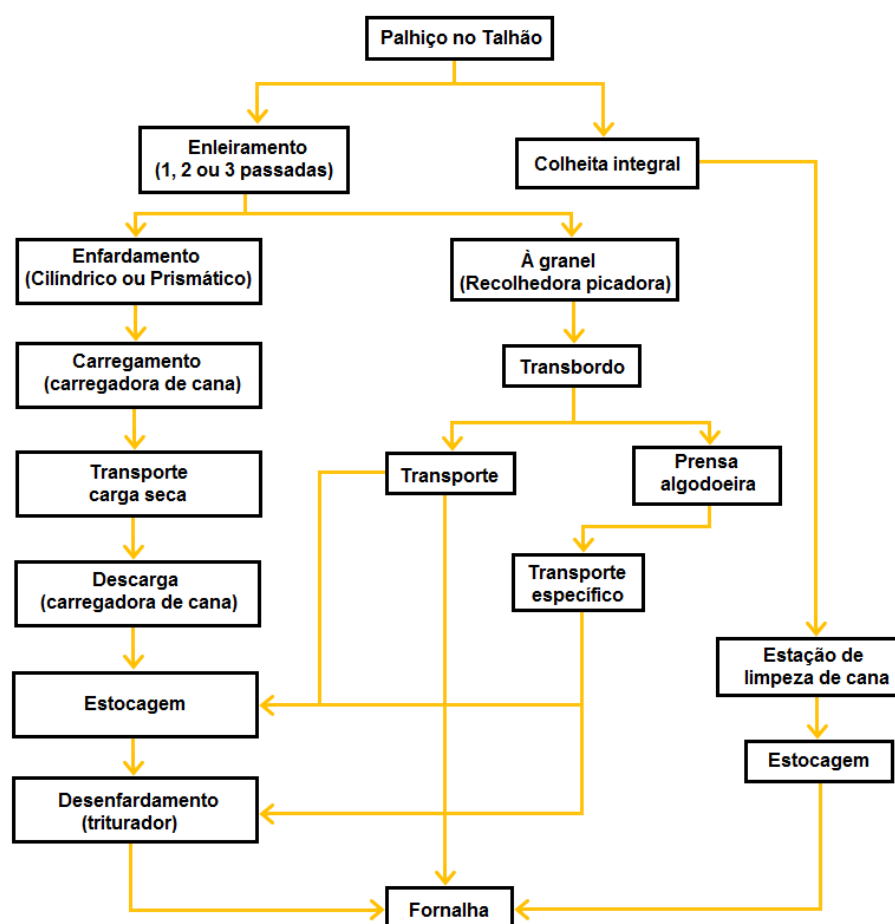


Figura 8 - Alternativas de recolhimento de palhiço em estudo.
Fonte: Ripoli e Ripoli (2009).

Torrezan (2003) analisou alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética em operações de enleiramento e enfardamento prismático

de palhiço de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, sem queima prévia. Os estudos foram realizados em área da Cosan-Usina Costa Pinto, Município de Piracicaba, SP. A variedade de cana-de-açúcar foi a RB82-5336, plantada em espaçamento de 1,40 m, em seu terceiro corte. O palhiço foi amostrado e analisado antes das operações de enleiramento e enfardamento, sendo obtido o poder calorífico superior de $18,43 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e inferior de $17,00 \text{ MJ.kg}^{-1}$. O valor médio do potencial energético do palhiço foi considerado em termos de equivalente barril de petróleo por hectare (EBP.ha⁻¹), sendo da ordem de 55,4 EBP.ha⁻¹. Foram realizados três tratamentos de enleiramentos: simples, duplo e triplo. O palhiço foi enleirado por meio de ancinho enleirador e enfardado com enfardadora prismática para fenação. Foi verificado que houve um aumento do teor de terra com enleiramentos sucessivos, sendo que o tratamento de enleiramento triplo apresentou em média 6,41% de terra nos fardo, enquanto que os tratamentos de enleiramento duplo e simples mostraram 6,31% e 5,71% respectivamente. A alta eficiência energética total de 99,53% indicou que o recolhimento do palhiço pode ser tecnicamente viável.

Molina Jr. et al. (1995) verificaram aspectos econômicos e operacionais para o enfardamento do palhiço por meio de uma enfardadora de forragem, visando seu aproveitamento energético. A variedade da cana-de-açúcar foi a SP70-6163 em canaviais de 2º e 3º cortes. O palhiço apresentou umidade média de 24% e poderes caloríficos superior e inferior da ordem de $18,08 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e $16,66 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Em relação ao desempenho do conjunto trator-enfardadora, foi verificado 1,11 t.h⁻¹ de resíduo colhido ou 0,26 ha.h⁻¹ trabalhado. Os resíduos foram enfardados sem enleiramento prévio com a intenção de não contaminar os fardos com matéria mineral, porém este procedimento não foi eficiente obtendo-se 3,2% de terra. O custo da operação na época calculado pelos autores foi de US\$ 17,47 e US\$ 15,04 por tonelada de palhiço recolhido.

Furlani Neto et al. (1997) determinaram a energia disponível no palhiço remanescente de cana-de-açúcar (SP71-1406, 4º corte e SP71-6163, 3º corte) colhida em canaviais com e sem queima prévia. Foram encontrados os poderes caloríficos mostrados na Tabela 13 podendo concluir que a queima da cana-de-açúcar antes da colheita causou uma perda energética em termos de PCS de $96.830,31 \text{ MJ.ha}^{-1}$ (39,2%) para a SP71-1406 e de $281.754,74 \text{ MJ.ha}^{-1}$ (59,4%) para a SP71-6163.

Tabela 13 - Poder calorífico superior do resíduo pós-colheita (palhiço).

Variedade da cana-de-açúcar	Tipos	Poder calorífico superior (MJ.kg ⁻¹)
SP71-1406	cana-de-açúcar crua	18,53
	cana-de-açúcar queimada	18,26
SP71-6163	cana-de-açúcar crua	19,50
	cana-de-açúcar queimada	18,76

Fonte: Furlani Neto et al. (1997).

De acordo com Michelazzo (2005), o aproveitamento do palhiço é dificultado devido ao seu alto custo de recolhimento. Assim ele realizou uma análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar desde a colheita até a entrega na esteira da usina e observou que o custo do transporte do palhiço diminuiu com o aumento da massa específica da carga transportada. A partir de cerca de 200 kg.m⁻³ de massa específica, observa-se uma queda menos acentuada no custo. Aproximadamente 500 kg.m⁻³, não se nota redução no custo de transporte. A Figura 9 mostra a influência da distância no custo do recolhimento.

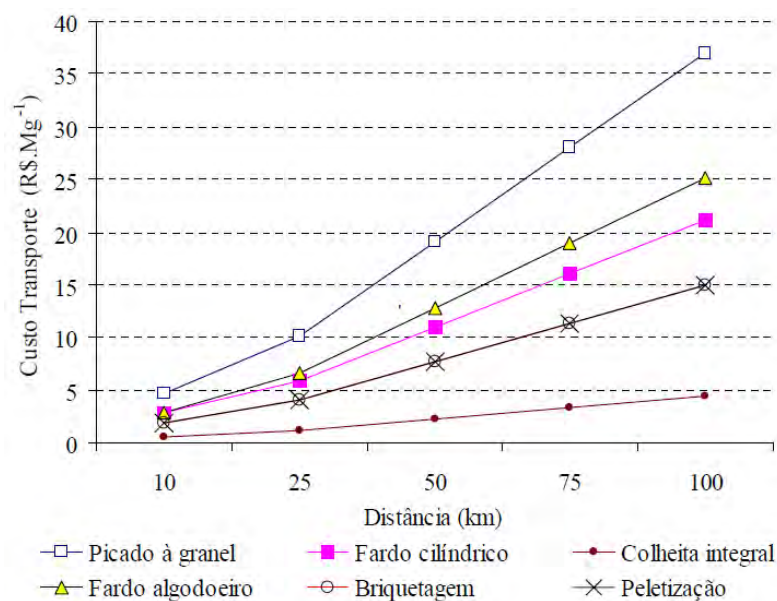


Figura 9 - Simulação do custo do transporte do palhiço até a usina em função da distância.
Fonte: Michelazzo (2005).

O sistema colheita integral foi o de menor custo (R\$ 0,59.t⁻¹) para distância de 10 km. Os sistemas de briquetagem e peletização apresentaram custos iguais de

R\$ 1,97.t⁻¹. Para os sistemas de fardo cilíndrico e de fardo algodoeiro o custo transporte foi de R\$ 2,91.t⁻¹ e R\$ 2,95.t⁻¹, respectivamente. Para o picado a granel o custo foi R\$ 4,77.t⁻¹, e para distância de transporte de 17 km, o custo chega a R\$ 7,3.t⁻¹. Para longas distâncias, a diferença nos custos acentua-se por causa da diferença do grau de adensamento atingido pelo palhicho. O tipo de sistema a ser usado no recolhimento pode ser escolhido em função da distância do local onde seria recolhido o palhicho, pois, é possível usar diferentes sistemas, variando-os de acordo com a distância a ser transportado e para qual finalidade terá o palhicho. Caso o palhicho tivesse a finalidade de ser utilizado na geração de energia, mediante sua queima em caldeiras, e as áreas de produção fossem próximas à usina, uma boa opção seria a utilização de sistemas de recolhimento com menor investimento, tais como o picado a granel ou colheita integral. Contudo se o palhicho, a ser recolhido, fosse produzido longe da usina o uso de sistemas de enfardamento seria mais adequado. De modo geral, de acordo com os resultados, o sistema colheita integral apresentou o menor custo de recolhimento do palhicho, tanto para distâncias pequenas como para grandes distâncias. Seguido pelos sistemas picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, peletização e briquetagem.

Franco (2003) realizou um estudo sobre o recolhimento do palhicho a granel utilizando-se equipamentos existentes no sistema de enleiramento e recolhimento. O estudo foi realizado em área pertencente ao grupo COSAN, localizada no município de Piracicaba, SP, com a variedade RB85-5113, em 2º corte e com produtividade média de colmos de 108 t.ha⁻¹. O desempenho operacional de dois ancinhos enleiradores foram comparados sendo denominados tratamentos 1 e 2. Os resultados da umidade do palhicho enleirado e os custos das operações de enleiramento em R\$.EBP⁻¹ foram calculados a partir de valores fornecidos pelo Grupo Cosan, são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Teores de umidade do palhicho enleirado e custos das operações de enleiramento.

	Teor de umidade (%)	Custo (R\$.EBP⁻¹)
T1	32,79	0,49
T2	42,09	0,24

Fonte: Franco (2003).

Posteriormente foram determinados alguns parâmetros de desempenho operacional de uma colhedora auto-propelida de forragem operando sobre leiras de palhicho

formadas por dois diferentes tipos de enleiradores. Foram adotados dois tratamentos, T1 e T2, sendo que cada um utilizou um tipo de enleirador e a mesma recolhadora de forragens. Dentre as variáveis analisadas o teor de terra e umidade no palhiço remanescente após o recolhimento com a colhedora de forragem são mostrados na Tabela 15. O custo da operação de recolhimento do palhiço enleirado foi fornecido pela Usina Costa Pinto – Grupo COSAN, com o valor de R\$.t⁻¹ 9,17, sendo possível calcular o custo em R\$.EBP⁻¹, conforme mostra a Tabela 15.

Tabela 15 – Teores de terra e umidade do palhiço remanescente após o recolhimento com recolhadora de forragem e custos da operação de recolhimento do palhiço enleirado.

	Teor de terra (%)	Teor de umidade (%)	Custo (R\$.EBP⁻¹)
T1	7,74	32,79	3,79
T2	7,56	42,10	3,97

Fonte: Franco (2003).

Finalmente, Franco (2003) caracterizou o palhiço previamente enleirado por dois tipos de enleiradores e recolhido por uma recolhadora de forragens, e determinou seu custo total, posto na usina. A umidade do palhiço recolhido e o teor de terra foram determinados, e os resultados estão na Tabela 16. A Tabela 16 também mostra também o custo total do palhiço posto na usina, ou seja, os custos da operação de enleiramento, recolhimento, transporte e descarregamento.

Tabela 16 - Teores de terra e umidade do palhiço recolhido e custos totais da operação de recolhimento do palhiço enleirado.

	Teor de terra (%)	Teor de umidade (%)	Custo total (R\$.EBP⁻¹)
T1	6,46	33,40	8,83
T2	8,38	36,37	8,97

Fonte: Franco (2003).

Sartori (2001) quantificou o palhiço da cana-de-açúcar e determinou o seu potencial energético, considerando a variedade da planta e estágio de corte. No primeiro experimento as variedades de cana-de-açúcar estudadas foram RB72-454 no 2º e 4º corte, SP79-1011 no 3º e 4º corte e RB80-6043, SP80-1842, RB83-5486, RB85-5536, todas no 1º corte. A umidade (média entre as diferentes variedades) dos componentes do palhiço foi de

76,09% para os ponteiros, 11,27% para as folhas secas e 61,32% para as folhas verdes. O poder calorífico superior também foi determinado para os componentes do palhico, sendo a média de 18,37 MJ.kg⁻¹ para os ponteiros, 18,51 MJ.kg⁻¹ para as folhas secas e 18,72 MJ.kg⁻¹ para as folhas verdes. No segundo experimento as variedades de cana-de-açúcar estudadas foram RB72-454, SP79-1011, RB83-5486, RB85-5536 e RB85-5113 todas do 1º ao 4º corte. O teor de umidade, poder calorífico superior e inferior (média entre os quatro estágios de corte) para folhas secas, ponteiros e folhas verdes são mostrados nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17 – Umidade dos constituintes do palhico de diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Componentes	Umidade (%)				
	RB72-454	RB83-5486	RB85-5113	RB85-5536	SP79-1011
Folhas secas	13,70	14,70	14,49	14,12	18,07
Ponteiros	77,34	76,47	78,13	76,47	76,95
Folhas verdes	60,80	59,90	62,04	61,83	61,14

Fonte: Sartori (2001).

Tabela 18 – Poder calorífico superior dos constituintes do palhico de diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Componentes	Poder calorífico superior (MJ.kg⁻¹)				
	RB72-454	RB83-5486	RB85-5113	RB85-5536	SP79-1011
Folhas secas	18,94	18,88	19,08	18,94	18,78
Ponteiros	18,09	18,02	17,78	17,97	17,90
Folhas verdes	19,09	19,02	18,96	18,89	18,86

Fonte: Sartori (2001).

Tabela 19 – Poder calorífico inferior dos constituintes do palhico de diferentes variedades de cana-de-açúcar.

Componentes	Poder calorífico inferior (MJ.kg⁻¹)				
	RB72-454	RB83-5486	RB85-5113	RB85-5536	SP79-1011
Folhas secas	17,63	17,54	17,73	17,60	17,47
Ponteiros	16,68	16,66	16,37	16,60	16,58
Folhas verdes	17,81	17,82	17,60	17,57	17,58

Fonte: Sartori (2001).

Bizuti (2003) estudou parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética para o enleiramento e enfardamento cilíndrico do palhico de cana-de-açúcar. Foram realizados enleiramento simples e duplo onde foi verificada a quantidade de terra nos fardos cilíndricos de acordo com o tipo de enleiramento, sendo 10,6% de terra para o

tratamento com uma passada da enleiradora e 8,1%, para o com duas passadas. O poder calorífico do palhiço foi de $18,4 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e o balanço energético do enleiramento mais enfardamento foi de 99,93% e 99,91%, para os tratamentos de enleiramento simples e duplo, respectivamente.

Ripoli (2002) estimou a umidade, o poder calorífico e o equivalente energético em barris de petróleo para o palhiço enfardado por meio de duas diferentes enfardadoras (de fardos cilíndricos e prismáticos). A operação de enfardamento foi realizada dez dias após a colheita da cana-de-açúcar, em área pertencente à Usina Costa Pinto, município de Piracicaba, SP. A variedade da cana-de-açúcar foi a RB82-5336, de terceiro corte, de 11 meses, com produtividade agrícola de colmos de 78 t.ha^{-1} . Obteve-se a umidade dos fardos variando de 14,68 a 30,50% e o seu equivalente energético estimado foi de 6,33 a 17,80 barris de petróleo por hectare.

Zuluaf et al. (1985, apud RIPOLI, 2002) estudaram o desperdício da energia liberada na queima da palha dos canaviais brasileiros. Verificaram que para safra de 1984/1985 aproximadamente 87.720 Gcal por ano de energia estava sendo perdida devido a queima dos canaviais. Estimaram a umidade, poder calorífico inferior e superior para a palha (folhas secas) da cana-de-açúcar plantada em diversas regiões do estado de São Paulo (Tabela 20).

Tabela 20 – Umidade, poderes caloríficos inferiores e superiores das folhas secas da cana-de-açúcar para diversas regiões do Estado de São Paulo.

Regiões	Variedades	Umidades (%)	PCS (MJ.kg^{-1})	PCI (MJ.kg^{-1})
Bauru	SP70-1143	21,3	18,05	12,86
Piracicaba	NA5679	18,6	16,65	12,52
Araraquara	NA5679	9,1	17,49	14,91
Ribeirão Preto	SP70-1143	8,0	17,14	14,79
Campinas	CP5122	11,3	17,15	14,18

Fonte: Zuluaf et al. (1985, apud RIPOLI, 2002).

Ripoli (2004) analisou a colheita integral da cana-de-açúcar e o enfardamento do palhiço residual da colheita convencional de cana-de-açúcar como sistemas de recolhimento e colocação do palhiço no pátio de uma usina para uso como energético. A área de estudo foi um canavial sem queima prévia, colhido por sistema mecanizado, localizado

em Piracicaba, SP. A variedade de cana-de-açúcar foi a SP80-1816 com espaçamento de plantio foi de 1,40 m. O palhiço no sistema de colheita integral apresentou umidade média de 48,59%, sendo 65,56% para as folhas verdes, 20,96% para as folhas secas e 78,13% para os ponteiros. A umidade e o teor de terra para o palhiço “in natura”, antes da operação de enleiramento foram de 16,64% e 2,95%, respectivamente. Para o palhiço enfardado foi encontrada umidade média entre diversos tratamentos de 14,55%, teor de terra de 6,43% e pode calorífico útil de 7,60 MJ.kg⁻¹. De acordo com o autor as variáveis fundamentais que definiram o melhor sistema de recolhimento do palhiço entre o sistema de colheita integral e o de enfardamento foram: Índice de Terra (1,39% e 0,63%, respectivamente); Eficiência Energética (98% e 83%, respectivamente) do Sistema e Custo Efetivo por Equivalente Energético do Palhiço, posto na usina (5,62 e 10,90%, respectivamente).

A Tabela 21 mostra alguns resultados para o poder calorífico do palhiço retirados de bibliografias citadas por Ripoli (2004).

Tabela 21 - Poderes caloríficos inferiores do palhiço retirados de diferentes bibliografias.

Autores	Poder calorífico inferior (MJ.kg⁻¹)
Bagatex (1984)	9,54
*Howe e Sreesangkon (1990)	15,80
**Staniforth (1982)	15,00
* Umidade entre 9,77% e 11,22%	
** Umidade de 15%	
Fonte: Ripoli (2004).	

O potencial energético de resíduos da colheita de cana-de-açúcar sem queima prévia foi determinado por Ripoli et al. (1991) para as variedades SP70-1284, SP70-1143, SP70-6163, SP11-406 e NA5679 na safra de 89-90. O poder calorífico superior e inferior (média entre todas as variedades) foi de 18.069,44 MJ.ha⁻¹ e 16.658,18 MJ.ha⁻¹ para os ponteiros; 18.412,11 MJ.ha⁻¹ e 17.135,99 MJ.ha⁻¹ para as folhas verdes; 18.154,79 MJ.ha⁻¹ e 16.741,86 MJ.ha⁻¹ para as folhas secas. A umidade ponderada do palhiço foi de 46,11% e o potencial energético equivalente a 29,06 barris de petróleo.ha⁻¹.

Germek (2005) realizou uma análise de decisão sobre o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, posto na unidade industrial, para fins de

cogeração. O estudo visou determinar rotas tecnológicas de menor custo para o aproveitamento dos resíduos da colheita e otimização das tecnologias de produção sucroalcooleira de cogeração, adequando o tamanho do particulado da fração da biomassa a ser agregada ao bagaço. O autor verificou que, por meio da técnica de modelagem matemática, pode-se chegar à rota tecnológica de menor custo, ou seja, a rota econômica para o aproveitamento do palhiço como fonte de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro, para ser comercializada junto às concessionárias privadas, bem como conhecer qual será o incremento de geração de energia que o palhiço oferecerá com relação ao bagaço. O mesmo autor, a partir das simulações realizadas, conclui que a rota tecnológica de menor custo de adequação do palhiço foi a da colheita integral seguida do recolhimento em fardos e a granel que não apresentaram diferenças significativas entre si.

Para avaliar se é vantajoso o aproveitamento do palhiço como fonte energética complementar ao bagaço, e se é possível o aproveitamento do palhiço posto no pátio da unidade industrial remunerar a aquisição dos equipamentos para compor o processo tecnológico de adequação do tamanho do palhiço para ser agregado ao bagaço na cogeração, Germek (2005) desenvolveu equações para serem empregadas pelo setor sucroalcooleiro em função das suas características locais e regionais.

Tendo com base as constantes:

$$1 \text{ kJ}.\text{seg}^{-1} = 1 \text{ kW}$$

$$1\text{MW} = 10^6 \text{ W}$$

μ = rendimento de transformação da turbina (0,20 a 0,25)

$$4,18 \text{ kJ}.\text{kcal}^{-1} \text{ ou } \text{MJ}.\text{Mcal}^{-1}$$

$$PCI_{\text{bagaço}} = \text{Poder calorífico inferior do bagaço} = 1.800 \text{ kcal}.\text{kg}^{-1} (1.800 \text{ Mcal}.\text{t}^{-1}) \text{ (Peres, 1978)}$$

$$PCI_{\text{palhiço}} = \text{Poder calorífico inferior do palhiço} 1.500 \text{ kcal}.\text{kg}^{-1} (1.500 \text{ Mcal}.\text{t}^{-1}) \text{ (adotado)}$$

4 a 12 toneladas de palhiço por hectare (Ripoli, 2003)

f_{pr} = Fração de palhiço recolhido (30%; 50%; 70% e 100%)

A relação entre palhiço disponível e cana-de-açúcar colhida pode ser obtida por meio da equação 2.

$$\text{Relação entre palhiço e cana-de-açúcar} = \frac{t_p \cdot ha^{-1}}{t_c \cdot ha^{-1}} \quad (2)$$

Sendo:

$t_p \cdot ha^{-1}$ = tonelada de palhiço disponível para recolhimento por hectare, 4 a 12 (Ripoli, 2003)

$t_c \cdot ha^{-1}$ = tonelada de cana colhida por hectare, 71,3 (Vieira, 2003)

Aplicando os valores mínimos e máximos de palhiço disponível dados por Ripoli et al. (2003) é possível determinar a relação existente entre o palhiço e a cana-de-açúcar tendo como base o rendimento agrícola da cana-de-açúcar e construir a Tabela 22 a seguir.

Tabela 22 - Resultados da aplicação da equação 2 de relação palhiço/cana-de-açúcar considerando a produtividade agrícola média do Estado de São Paulo de 71,3 t.ha⁻¹.

$T_p \text{ (t.ha}^{-1}\text{)}$	$T_p \cdot T_c^{-1} \text{ (t.t}^{-1}\text{)}$
4	0,056
6	0,084
8	0,112
10	0,140
12	0,168

Fonte: Germek (2005).

De acordo com Germek (2005), cada unidade industrial, deverá levantar as suas características próprias e aplicar as equações desenvolvidas para poder determinar os seus próprios valores que permitirão a tomada de decisão que melhor se adapta as suas características. Com base nos valores determinados, o autor mostra uma equação que possibilita conhecer a potência a ser fornecida pelo uso do bagaço como combustível na cogeração de energia elétrica na unidade industrial.

$$E_b = TCH \cdot BAG \cdot PCI_{bagaço} \cdot \alpha \cdot \Omega \cdot \phi \cdot \mu \quad (3)$$

Sendo:

E_b = potência gerada pelo bagaço, MW

TCH = toneladas de cana-de-açúcar esmagada por hora, $t.h^{-1}$

BAG = produção de bagaço por tonelada de cana, $kg.t^{-1}$ (250 $kg.t^{-1}$)

$PCI_{bagaço}$ = Poder calorífico inferior do bagaço, $Mcal.t^{-1}$ (1.800 $Mcal.t^{-1}$)

α = fator de conversão de trabalho em $MJ.Mcal^{-1}$ (4,18 $MJ.Mcal^{-1}$)

Ω = fator de conversão do tempo em segundo por hora (1/3.600 $seg.h^{-1}$)

ϕ = fator de conversão de energia em $MW/MJ.seg^{-1}$ (10^{-3} $MW/MkJ.seg^{-1}$)

μ = rendimento de transformação da turbina, % (20 - 25%)

Deduzindo a equação 3 e eliminando os fatores iguais tem-se a equação 4.

$$E_b = 0,5225.\mu.TCH \quad (4)$$

Da mesma maneira é possível deduzir a equação de modelagem para o palhiço e determinar qual seria a potência a ser gerada levando-se em consideração várias frações de recolhimento do mesmo na lavoura (30%, 50%, 70% e 100%).

$$E_p = TCH.PAL.frp.PCI_{palhiço}.\alpha.\Omega.\phi.\mu \quad (5)$$

Sendo:

E_p = Potência gerada pelo palhiço, MW

TCH = toneladas de cana-de-açúcar esmagada por hora, $t.h^{-1}$

PAL = produção de palhiço por tonelada de cana em $kg.t^{-1}$

frp = Fração de palhiço recolhido (30%; 50%; 70% e 100%)

$PCI_{palhiço}$ = Poder calorífico inferior do palhiço, $Mcal.t^{-1}$ (1.500 $Mcal.t^{-1}$)

α = fator de conversão de trabalho em $MJ.Mcal^{-1}$ (4,18 $MJ.Mcal^{-1}$)

Ω = fator de conversão do tempo em segundo por hora (1/3.600 $seg.h^{-1}$)

ϕ = fator de conversão de energia em $MW.MJ.seg^{-1}$ (10^{-3} $MW/MkJ.seg^{-1}$)

μ = rendimento de transformação da turbina, % (20 - 25%)

Deduzindo a equação 5 e eliminando os fatores iguais tem-se:

$$E_p = 1,16.10^{-3} \cdot \mu.TCH \cdot \frac{t_p}{t_c} \cdot frp.PCI_{palhiço} \quad (6)$$

Sendo:

t_p/t_c = tonelada de palhiço por tonelada de cana

Para o cálculo da potência total a ser gerada soma-se as duas equações (4 e 6), ou seja:

$$E_t = E_b + E_p \quad (7)$$

O diferencial de aumento devido ao palhiço pode ser calculado empregando-se a equação:

$$\Delta E\% = \left\{ (E_b + E_p) / E_b \right\} \cdot 100 \quad (8)$$

Substituindo na equação 8 as potências geradas pelas equações 4 e 6 que representam as potências do bagaço e do palhiço respectivamente, obtêm-se a equação 9.

$$E\% = \left(1 + 2,22.10^{-3} \cdot \frac{t_p}{t_c} \cdot frp.PCI_{palhiço} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Para se fazer uma análise própria para cada empreendimento pode-se adotar a equação geral a seguir aplicando os dados disponíveis para cada situação agronômica:

$$E_t = E_b + E_p = \frac{TCH}{3600} \cdot R.4,18 \left[\left(\frac{t_p}{t_c} \cdot frp.PCI_{palhiço} \right) + \left(\frac{t_b}{t_c} \cdot PCI_{bagaço} \right) \right] \quad (10)$$

Sendo:

E_t = potência total gerada, MW

E_p = potência gerada pelo bagaço, MW

E_b = potência gerada pelo palhiço, MW

TCH = toneladas de cana-de-açúcar esmagada por hora, $t.h^{-1}$

R = Rendimento global da transformação de calor gerado em eletricidade ($r = 0,20$)

t_c = tonelada de cana-de-açúcar colhida

t_b = toneladas de bagaço produzido

t_p = toneladas de palhiço produzido

$PCI_{palhiço}$ = poder calorífico inferior do palhiço, $Mcal.t_p^{-1}$

$PCI_{bagaço}$ = poder calorífico inferior do bagaço, $Mcal.t_b^{-1}$

As equações proporcionadas pelo estudo de Germek (2005) permitem aplicar valores específicos de cada empreendimento permitindo ao usuário determinar os valores auxiliando na análise de decisão gerencial de cada situação. Segundo o mesmo autor, as equações lineares desenvolvidas neste estudo mostraram que o potencial de incremento de energia de biomassa gerada pelo uso do palhiço adicional ao bagaço é da ordem de 5,59% a 55,94% dependendo das características do canavial e do percentual de recolhimento adotado, além do que o aproveitamento do palhiço e resíduos vegetais canavieiro permite gerar recursos financeiros adicionais na produção sucroalcooleira.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição e caracterização da usina onde foi realizada a pesquisa

A Usina Açucareira São Manoel S.A. (Figura 10) está localizada no município de São Manuel, na Fazenda Boa Vista, cerca de 8 km do centro urbano e em uma região central do estado de São Paulo. Atualmente, são cultivados, aproximadamente, 29 mil hectares de cana-de-açúcar para produção de: a) açúcar cristal branco; b) álcool etílico hidratado carburante; c) levedura seca inativa, obtida por meio da fermentação do caldo de cana-de-açúcar e utilizada para adição em rações para alimentação animal.

A empresa foi fundada em 1949 e produziu em sua primeira safra 1.517 toneladas de açúcar e 15.000 litros de álcool. Na última safra (2008/2009) a produção foi de 177.655 toneladas de açúcar e 141.153 milhões de litros de álcool, apresentando uma moagem de quase 3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.



Figura 10 – Vista geral da Usina São Manoel.

Fonte: Arquivo pessoal.

As principais características da unidade industrial pesquisada e dados de produção da safra de 2008 são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Descrição da Usina São Manoel para safra de 2008.

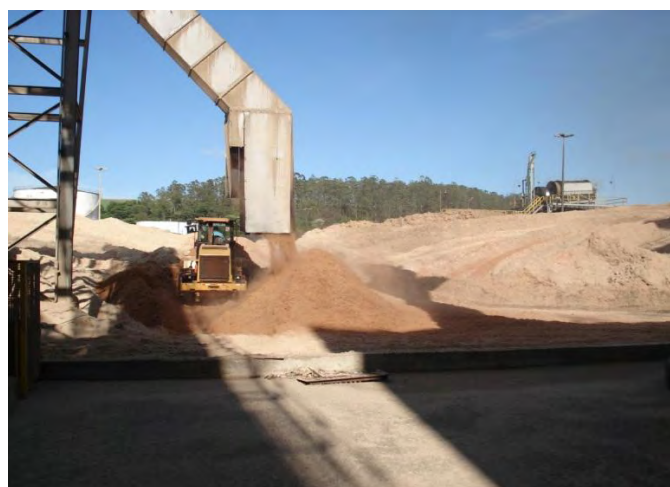
Área total	960.000 m ²
Área construída	46.000 m ²
Número de funcionários	3.250
Início da safra	07/04/2008
Término da safra	23/12/2008
Dias consecutivos de safra	255
Dias efetivos de moagem	228
Principal variedade de cana-de-açúcar	RB86-7515 (34,89%)
Área plantada da variedade RB86-7515	13.462,83 há
Área total de plantação	38.589,09 há
Distância da área de plantação da variedade RB86-7515 até a usina	21,75 km
Área total colhida	29.302,26 há
Toneladas de cana-de-açúcar colhida por hectare	99,78 t.ha ⁻¹
Produção de cana-de-açúcar e moagem	2.923.912,890 t
Moagem horária efetiva	624 t.h ⁻¹
Produção de açúcar	177.655,85 t
Produção de álcool	141.153.000 L

Fonte: Usina São Manoel.

A Usina São Manoel tem o bagaço como subproduto do processo de extração do caldo da cana-de-açúcar e parte dele é utilizada para alimentar as caldeiras, produzir vapor para movimentar os equipamentos da usina e gerar energia elétrica para o consumo próprio. Outra parte do bagaço é vendida para empresas da região ou até mesmo doada dependendo da quantidade disponível. A Figura 11(a) e (b) mostra o bagaço excedente depositado no pátio. Esse bagaço também é utilizado nas caldeiras quando ocorre alguma parada na moagem. A Tabela 24 mostra a quantidade de bagaço disponível por safra e seu respectivo uso.



(a)



(b)

Figura 11 – (a) e (b) Bagaço depositado no pátio da Usina São Manoel.

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 24 – Bagaço disponível e sua utilização na Usina São Manoel nos anos de 2005 a 2008.

Bagaço (t)	2005	2006	2007	2008
Produção	440.889	496.235	608.290	726.735
Consumo	364.202	413.202	528.845	663.741
Venda	64.629	67.982	67.407	49.994
Doação	58	51	39	33
Estoque	12.000	15.000	12.000	13.000

Fonte: Usina São Manoel.

A usina trabalha com dois sistemas de corte da cana-de-açúcar. A maior parte da cana-de-açúcar é queimada antes da colheita para facilitar o corte tanto manual

como mecânico. No entanto, a cada ano, a usina aumenta a quantidade de cana-de-açúcar cortada sem queima prévia (cana-de-açúcar crua), e, conseqüentemente, aumenta o corte mecanizado, conforme pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 – Quantidade de cana-de-açúcar colhida após a queima, cana-de-açúcar colhida crua, cana-de-açúcar colhida por corte mecanizado e cana-de-açúcar colhida manualmente.

	2005		2006		2007		2008	
	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%
Cana queimada	1.668.259,270	98,08	1.940.176,020	95,97	2.190.765,160	92,95	2.246.316,180	76,8
Cana crua	32.622,800	1,92	81.431,550	4,03	166.236,440	7,05	677.619,280	23,2
Corte mecanizado	321.192,830	18,88	1.655.705,49	18,09	492.257,910	20,88	950.339,630	32,5
Corte manual	1.379.689,24	81,12	365.902,080	81,90	1.864.743,690	79,12	1.973.595,830	67,5

Fonte: Usina São Manoel.

5.1.1 Sistema de geração de vapor

O sistema de geração de vapor da Usina São Manoel é composto por quatro caldeiras (Figura 12). Três caldeiras possuem pressão de trabalho de 23 kgf.cm⁻², a quarta caldeira tem pressão de trabalho entre 23 e 67 kgf.cm⁻², porém trabalha com a inferior do mesmo modo que as demais. Os dados do fabricante são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Parâmetros termodinâmicos das quatro caldeiras da Usina São Manoel.

Caldeira	Fabricante	Pressão de trabalho (kgf.cm ⁻²)	Temperatura do vapor (°C)	Capacidade de produção de vapor (kg.h ⁻¹)
1	Mitre Engenharia	23	300	70000
2	Mitre Engenharia	23	300	70000
3	Mitre Engenharia	23	300	70000
4	Caldema Equipamentos Industriais	23 a 67	330/490	140000/120000

Fonte: Usina São Manoel.



(a)



(b)

Figura 12 – (a) Caldeira de pressão de trabalho de 23 kgf.cm^{-2} , (b) caldeira de pressão de trabalho de $23 \text{ a } 67 \text{ kgf.cm}^{-2}$.

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 27 mostra dados fornecidos pela usina, referentes ao consumo de bagaço em cada uma das caldeiras bem como a produção total para safra de 2008.

Tabela 27 – Consumo de bagaço nas caldeiras da Usina São Manoel na safra de 2008.

SAFRA 2008	Tonelada de bagaço por hora ¹	Tonelada de bagaço por dia ²	Tonelada de bagaço por safra
Produção total	154,01	3.187,34	726.735
Consumo caldeiras – total	140,66	2.911,14	663.741
Caldeira 1	28,99	600,14	136.832,60
Caldeira 2	28,99	600,14	136.832,60
Caldeira 3	28,99	600,14	136.832,60
Caldeira 4	53,67	1.110,71	253.243,21
Bagaço excedente	13,35	276,29	62.994

1 Horas efetivas de moagem na safra de 2008 = 4718,75 horas;

2 Dias efetivos de moagem na safra de 2008 = 228 dias.

Fonte: Usina São Manoel.

Pode ser verificado que a caldeira 4 consome quase o dobro de bagaço que as demais, no entanto sua capacidade de produção de vapor também é duas vezes maior.

A Figura 13 mostra um esquema simplificado da rede de vapor da Usina São Manoel.

O ciclo a vapor ocorre da seguinte maneira: o bagaço sai da moenda com umidade de, aproximadamente, 50% e é transferido por meio de esteiras até os dosadores de bagaço (Figura 14). Os dosadores de bagaço alimentam a caldeira, onde o bagaço é queimado, aquecendo a água e produzindo vapor. A água utilizada nas caldeiras é proveniente de poço artesiano e captada através de bombas hidráulicas. Um sistema de osmose reversa é utilizado para o tratamento da água. A água vinda da estação de tratamento passa primeiramente por um desaerador térmico, juntamente com o vapor condensado no processo e uma parte do vapor de escape. O desaerador térmico tem como função remover gases não condensáveis (principalmente oxigênio) da água de alimentação das caldeiras e de retorno de condensado e também promove o pré aquecimento da água que será enviada para as caldeiras.

O vapor produzido nas caldeiras é de alta pressão (“vapor direto”), sendo utilizado para movimentar as turbinas de processo (picador, desfibrador e ternos 1 a 6 da moenda), as turbinas para geração de energia (turbogeradores 1, 2, 3 e 4) e turbo bombas de alimentação de água das caldeiras 3, 4 e 5. Em seguida o vapor de baixa pressão que sai dessas turbinas (“vapor de escape”) é enviado por meio de uma rede de distribuição a diferentes equipamentos do processo de fabricação de álcool e açúcar e uma fração do vapor de escape retorna para o desaerador térmico. Antes de ser utilizado nos equipamentos da fábrica de álcool e açúcar, o vapor de escape passa por dessuperaquecedores a fim de diminuir a temperatura do vapor por meio da adição de água da vinda do desaerador. Na destilaria todo vapor de escape é consumido no processo de produção do álcool; na fabrica de açúcar o vapor de escape é consumido nos pré evaporadores gerando vapor vegetal que se condensa e retorna para o desaerador térmico.

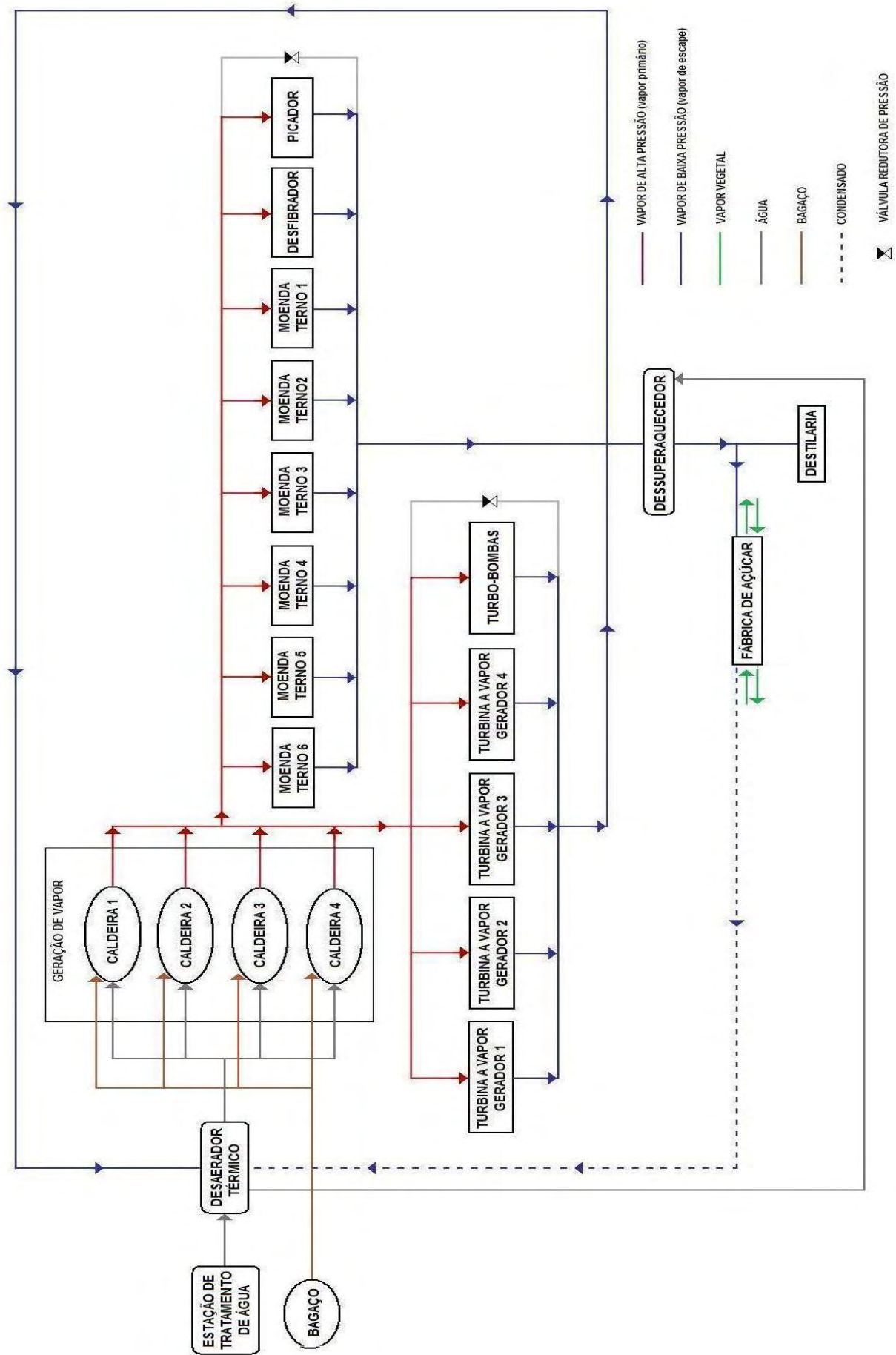


Figura 13 – Esquema da rede de vapor da Usina São Manoel

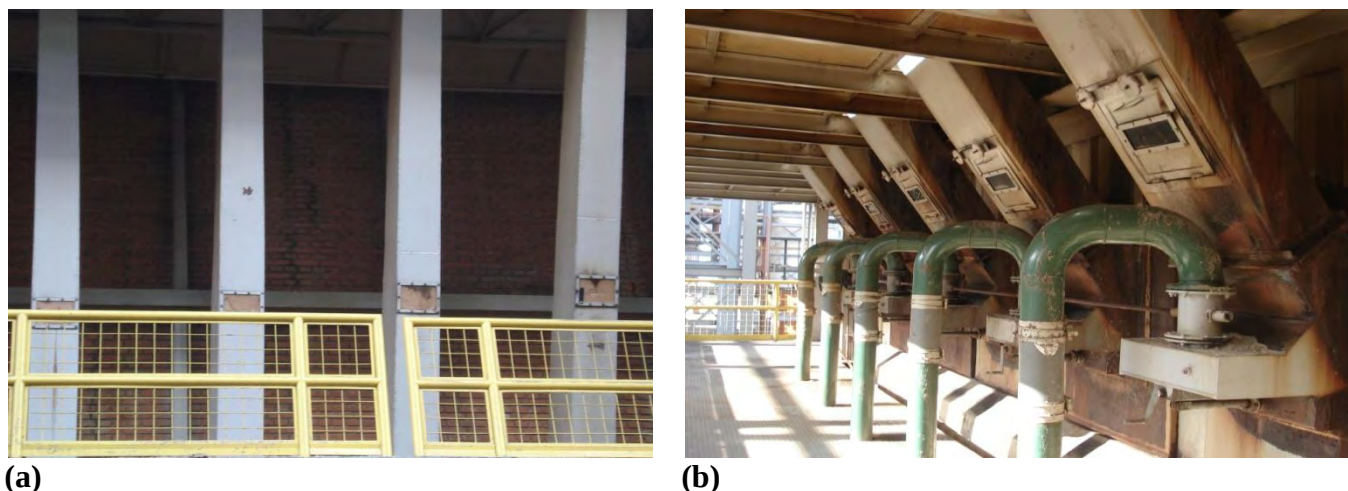


Figura 14 – Dosadores de bagaço: (a) Caldeira de pressão de trabalho de 23 kgf.cm^{-2} , (b) caldeira de pressão de trabalho de 23 a 67 kgf.cm^{-2} .

Fonte: Arquivo pessoal.

5.1.2 Sistema de geração de energia elétrica

A Usina São Manoel gera energia elétrica para suas necessidades, porém não é auto-suficiente. Isto ocorre devido a interrupções em períodos prolongados de chuva e em toda entressafra onde as caldeiras ficam paradas para manutenção. Nesses momentos o suprimento adicional de energia é atendido pela concessionária “Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL)”. A Tabela 28 mostra o relatório de energia elétrica de 2008, onde pode ser verificado que a quantidade de energia gerada pela usina atende cerca de 96,38% da sua demanda total, sendo 3,62% adquirida da CPFL. Já no período da safra a porcentagem de energia comprada da concessionária é de 1,69%. Por meio dos dados de quantidade de cana-de-açúcar moída (tonelada de cana-de-açúcar – TC) e a energia consumida (kWh) pela usina pode ser encontrado um consumo específico médio de $15,76 \text{ kWh.TC}^{-1}$ na safra de 2008.

Tabela 28 – Relatório de energia elétrica da Usina São Manoel no ano de 2008.

2008	Demanda de potencia - CPFL (kW)	Consumo total - CPFL (kWh)	Energia elétrica auto-gerada (kWh)	Energia elétrica total (kWh)	Moagem (TC)
Janeiro	792	262.081	0	262.081	0
Fevereiro	854	274.459	0	274.459	0
Março	1.419	386.725	0	386.725	0
Abril	1.349	123.012	2.262.783	2.385.795	150.057
Mai	1.426	66.143	4.580.853	4.646.996	324.285
Junho	1.558	12.117	5.296.098	5.308.215	337.556
Julho	1.555	58.434	6.439.446	6.497.880	459.975
Agosto	1.408	8.578	5.543.426	5.552.004	361.777
Setembro	1.557	179.166	6.070.905	6.250.071	385.387
Outubro	1.554	28.494	4.981.536	5.010.030	293.150
Novembro	1.554	59.097	5.857.990	5.917.087	370.484
Dezembro	1.381	244.710	4.276.000	4.520.710	241.242

Fonte: Usina São Manoel.

O sistema de geração de energia elétrica é composto por quatro turbogeradores. A potência de operação de dois geradores é de 2.400 kW, outro tem potência de 2.000 kW e o mais recentemente instalado é de 8.000 kW. Assim, a capacidade para geração de energia instalada na usina é de 14.800 kW. Todos os turbogeradores são de múltiplo estágio com contrapressão de 1,3 kgf.cm⁻². A energia elétrica é produzida nas tensões de 6,5 kV nos geradores 1 e 2, 4,8 kV no gerador 3 e 11,4 kV no gerador 4, sendo todas elevadas para 11,4 kV por meio de um transformador elevador de tensão. Em seguida, é distribuída em diversos circuitos alimentadores e rebaixada nos pontos de consumo para 440 V.

No ano de 2008, a usina gerou energia durante 5550 horas. No mesmo ano a potência total auto-gerada foi de 45.309.037 kWh, sendo, portanto a potência ativa média dos geradores de 8.164 kW. Considerando que a potência total instalada é de 14800 kW o fator de utilização dos geradores foi de 55,2%. A Figura 15 mostra os turbogeradores 3 e 4.

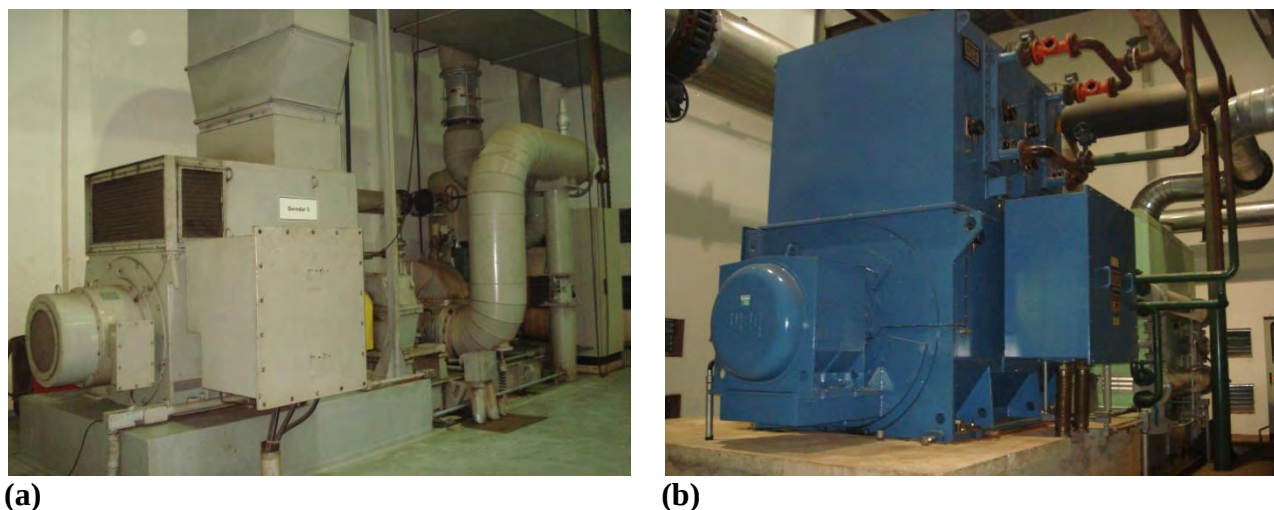


Figura 15 – Turbogeneradores da Usina São Manoel: (a) Turbogenerador 3 com potência de 2.000 kW, (b) turbogenerador 4 com potência de 8.000 kW.

Fonte: Arquivo pessoal.

5.1.3 Corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar

Como já mencionando anteriormente, o corte mecanizado na Usina São Manoel correspondeu na safra de 2008 a 32,5% da cana-de-açúcar colhida, lembrando que esse número deve aumentar, visto que em 2021 a queima da cana-de-açúcar deve ser totalmente eliminada em áreas com declividade inferior a 12%.

Para realização do corte mecânico a usina possui 4 colhedoras Cameco (Mod. CHT 2500B), 10 colhedoras John Deere (Mod. 3510) e 4 colhedoras John Deere (Mod. 3520). Concomitante ao corte, as colhedoras despejam a cana-de-açúcar lateralmente em um transbordo tracionado por um trator (Figura 16). O uso dos transbordos ameniza a compactação do solo que seria causada pela entrada dos caminhões nos talhões, pois possuem pneus especiais de alta flutuação com 80 cm de largura.



Figura 16 – Colheita mecanizada da cana-de-açúcar na Usina São Manoel.
Fonte: Arquivo pessoal.

Posteriormente, os transbordos transferem a cana-de-açúcar para os reboques de cana-de-açúcar picada, e os caminhões realizam o transporte até a usina (Figura 17).



Figura 17 – Transferência da cana-de-açúcar picada do transbordo para o caminhão com reboque.
Fonte: Arquivo pessoal.

A usina conta com os seguintes equipamentos para realização do corte mecânico e manual: 68 transbordos (16 – SMR 12500; 48 - ATA 10500; 4 - ATA 8000), 41 tratores (20 para reboque da cana-de-açúcar inteira e 21 para reboque da cana-de-açúcar

picada), 38 caminhões (22 para transporte da cana-de-açúcar inteira e 16 para transporte da cana-de-açúcar picada), 15 carregadoras de cana-de-açúcar, 160 reboques (104 de 20 t para cana-de-açúcar inteira, 48 de 20 t para cana-de-açúcar picada e 8 de 35 t para cana-de-açúcar picada) e 8 semi reboques de 28 t para cana-de-açúcar picada.

A Tabela 29 mostra dados de custo de corte, carregamento e transporte na safra de 2008 para cana-de-açúcar inteira (corte manual) e cana-de-açúcar picada (corte mecânico). É verificado para esta safra um custo total menor para cana-de-açúcar colhida mecanicamente.

Tabela 29 – Custo do corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar na Usina São Manoel – safra de 2008.

Cana-de-açúcar inteira	Custo R\$/tonelada	Cana-de-açúcar picada	Custo R\$/tonelada
Corte Manual	5,55	-----	-----
Carregadora	1,45	Colhedora	5,63
Reboque Cana Inteira	2,90	Reboque Cana Picada	3,51
Caminhão Cana Inteira	4,00	Caminhão Cana Picada	3,15
Total	13,90	Total	12,28

Fonte: Usina São Manoel.

Deve ser salientado que o corte mecânico também é realizado na cana-de-açúcar previamente queimada e ocorrem perdas na colheita mecânica dependendo das condições da cana-de-açúcar, ou seja, se está crua ou queimada. A Tabela 30 mostra as perdas na colheita mecânica.

Tabela 30 – Perdas na colheita mecânica da cana-de-açúcar na Usina São Manoel em t.ha⁻¹ – safra de 2008.

Tipo de corte	Cana inteira	Pontas	Toletes	Toco	Estilhaço	Soqueira	Pedaco cana	Total	% Total de Total
Mecânico Queimada	0,002	0,002	0,376	0,377	0,034	0,131	0,552	1,472	1,45
Mecânico Crua	0,000	0,000	0,427	0,517	0,063	0,073	0,786	1,866	2,06
Média aritmética	0,001	0,001	0,402	0,447	0,048	0,102	0,669	1,669	-----

Fonte: Usina São Manoel.

5.2 Estimativa da quantidade de biomassa residual de cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) gerada pela Usina São Manoel.

Para estimar a quantidade de biomassa residual da cana-de-açúcar, foram quantificados o bagaço gerado a partir de dados fornecidos pela usina para a safra de 2008 e foram realizadas determinações de campo para o palhiço obtidas na safra de 2009, em área pertencente a Usina São Manoel.

O talhão onde foi recolhido o palhiço está localizado na Fazenda Serrito, Quadra 10, Bloco 3 e possui 4,90 ha com 6% de declividade. A variedade da cana-de-açúcar plantada foi a RB86-7515, no 3º estágio de corte, com espaçamento de 1,40 m. A cana-de-açúcar nesta área foi colhida nos dias 10, 11 e 12 de setembro de 2009 e as amostras de palhiço foram recolhidas no dia 13 de setembro de 2009.

A quantidade de palhiço foi determinada seguindo metodologia adaptada de Torrezan (2003). Utilizou-se um gabarito composto por uma corda e estacas, conforme mostra a Figura 18. O gabarito foi fixado ao solo em 10 áreas escolhidas aleatoriamente e todo palhiço contido no interior do quadrado foi recolhido, ensacado e pesado. Tendo o gabarito 1m^2 de área, foi possível estimar a quantidade em massa de palhiço por m^2 e expandir para tonelada de palhiço por hectare de cana-de-açúcar plantada. Deve ser salientado que apenas uma parte da cana-de-açúcar da Usina São Manoel é colhida crua e 50% do palhiço deve permanecer no campo por questões agrônômicas. Sabendo-se a porcentagem de colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua e o rendimento agrícola da cana-de-açúcar da Usina São Manoel em toneladas de cana por hectare obteve-se a quantidade de palhiço disponível para recolhimento em tonelada de palhiço por tonelada de cana e, finalmente, a quantidade gerada na safra de 2008.



Figura 18 – Operação de recolhimento do palhiço: (a) gabarito de 1m² colocado sobre o palhiço, (b) corte lateral do palhiço, (c) recolhimento do palhiço contido dentro do gabarito, (d) solo limpo, final da operação.

Foram recolhidas 10 amostras para a estimativa da quantidade de palhiço.

Após a pesagem, 6 amostras de palhiço foram colocadas individualmente em cima de uma lona plástica e separadas em palha, folhas verdes e material restante (colmos, ponteiros e matéria estranha) (Figura 19). Cada constituinte do palhiço teve sua massa obtida individualmente.



Figura 19 – Separação dos constituintes do palhiço em folhas secas, folhas verdes e material restante em cima de lona plástica.

5.3 Determinação das impurezas minerais (terra) do palhiço

Para determinação do teor de terra no palhiço foram usadas as 4 amostras restantes que não foram separadas em seus constituintes. Essas 4 amostras foram misturadas e retiradas outras 6 amostras contendo cerca de 15 g.

As amostras foram colocadas em cadinhos e levadas a mufla (Quimis) com temperatura de $(800 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ por duas horas aproximadamente, ou seja, até que todo palhiço se queimasse. Após o resfriamento em dessecador a massa final foi determinada.

O teor de terra foi calculado de acordo com a equação 11:

$$TT = \frac{M_R}{M_p} 100 \quad (11)$$

Onde:

TT = teor de terra, %

M_R = massa do resíduo obtido após tratamento da amostra a $(800 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, g

M = massa da amostra de palhiço, 15 g

5.4 Caracterização energética do bagaço e palhiço gerados pela Usina São Manoel

5.4.1 Determinação do teor de umidade e potencial energético do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço

O teor de umidade do bagaço é determinado diariamente no laboratório industrial da Usina São Manoel, não sendo necessário a realização deste teste, pois a usina forneceu o resultado. O teor de umidade foi obtido pela média percentual da safra de 2008. Para a determinação da umidade do bagaço, a usina utiliza a mesma metodologia descrita abaixo para o palhiço.

Para determinação do teor de umidade do palhiço, foram retiradas seis amostras de cada constituinte (palha, folhas verdes e ponteiros) já separados conforme descrito no item 5.2. Utilizando uma balança (Sartorius, BP 3100P) foram pesados aproximadamente 50 g de cada amostra, colocados em um recipiente previamente seco e tarado. O recipiente com a amostra foi levado a uma estufa (Tecnal, TE-060) para secagem na temperatura de $105 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceu até que a massa da amostra se tornasse constante. A amostra retirada da estufa foi resfriada em um dessecador e então teve sua massa determinada.

Os cálculos relativos ao teor de umidade foram efetuados de acordo com a (12):

$$U = \frac{M_U - M_S}{M_U} 100 \quad (12)$$

Sendo:

U = teor de umidade, %

M_U = massa úmida da amostra, g

M_S = massa seca da amostra, g

A determinação do teor de umidade do palhiço como um todo foi realizada levando-se em consideração a massa e o percentual de umidade referente a cada constituinte, de acordo com a equação 13.

$$U_p = \frac{(M_{Pa} \cdot U_{Pa}) + (M_{FV} \cdot U_{FV}) + (M_{Po} \cdot U_{Po})}{M_{Pa} + M_{FV} + M_{Po}} \quad (13)$$

Sendo:

U_p = umidade total do palhiço, %

M_{Pa} = massa das palhas, kg

U_{Pa} = umidade das palhas, %

M_{FV} = massa das folhas verdes, kg

U_{FV} = umidade das folhas verdes, %

M_{Po} = massa dos ponteiros, kg

U_{Po} = umidade dos ponteiros, %

Para obtenção do poder calorífico, o bagaço e o palhiço foram transformados em pequenas partículas por meio de um moinho Frezer/Mill 6750. A amostra isenta de umidade teve seu poder calorífico superior (PCS) determinado, baseando-se na norma NBR 8633 da ABNT/1884 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984). As medidas foram realizadas em calorímetro da marca PARR 1201 pertencente ao Departamento de Química e Bioquímica do Instituto de Biociências - UNESP – Campus de Botucatu - SP.

Primeiramente, foi realizada a calibração do aparelho utilizado. Para determinação do PCS de diferentes materiais, o processo de calibração é importante, e pode ser realizado a partir do PCS de materiais de referência. Para o presente estudo foram utilizadas pastilhas de ácido benzóico que possui PCS conhecido (6318 cal.g^{-1}).

Com 1,0 g de ácido benzóico foi confeccionada uma pastilha utilizando uma prensa manual, conforme mostra a Figura 20.

O calorímetro foi montado como mostrado na Figura 21.

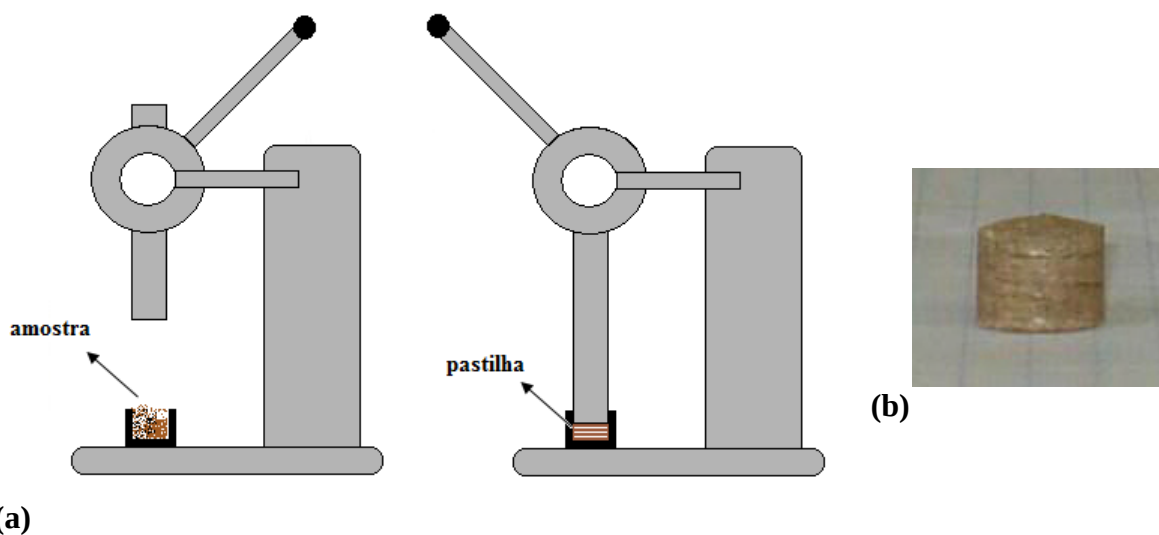


Figura 20 – (a) Confecção da pastilha na prensa manual, (b) pastilha de bagaço.

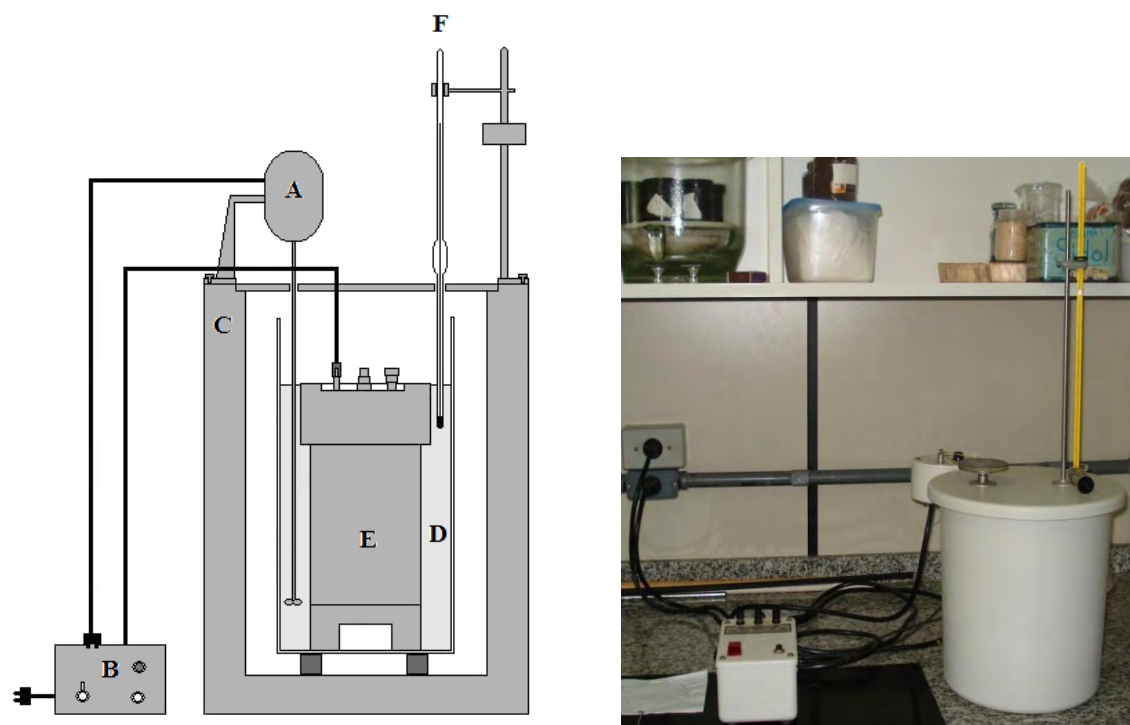


Figura 21 - Conjunto do calorímetro: (A) agitador elétrico, (B) fonte que faz a ignição da pastilha no interior da bomba, (C) recipiente isolante térmico, (D) recipiente com água, (E) bomba calorimétrica, (F) termômetro de mercúrio.

As Figuras 22 e 23 mostram a montagem da bomba calorimétrica. A pastilha de ácido benzóico foi colocada em um cadinho de aço inox e amarrada com um fio de

níquel-cromo (aproximadamente 10 cm). As extremidades do fio de níquel-cromo foram fixadas aos contatos elétricos da tampa que contem as válvulas de entrada e saída de gases (Figura 22 (a)). Colocou-se esta peça na abertura da bomba sobre anéis de vedação e a bomba foi fechada com uma tampa vazada para permitir o acesso às válvulas e contato elétrico.

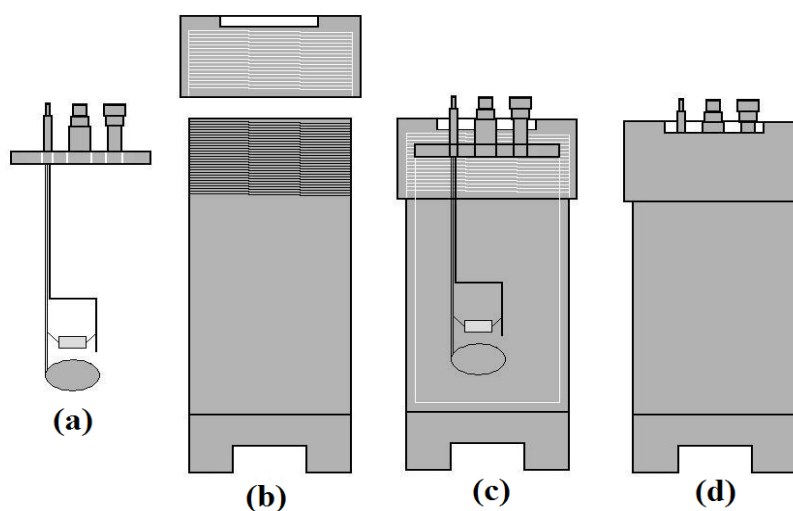


Figura 22 - Montagem da bomba calorimétrica.

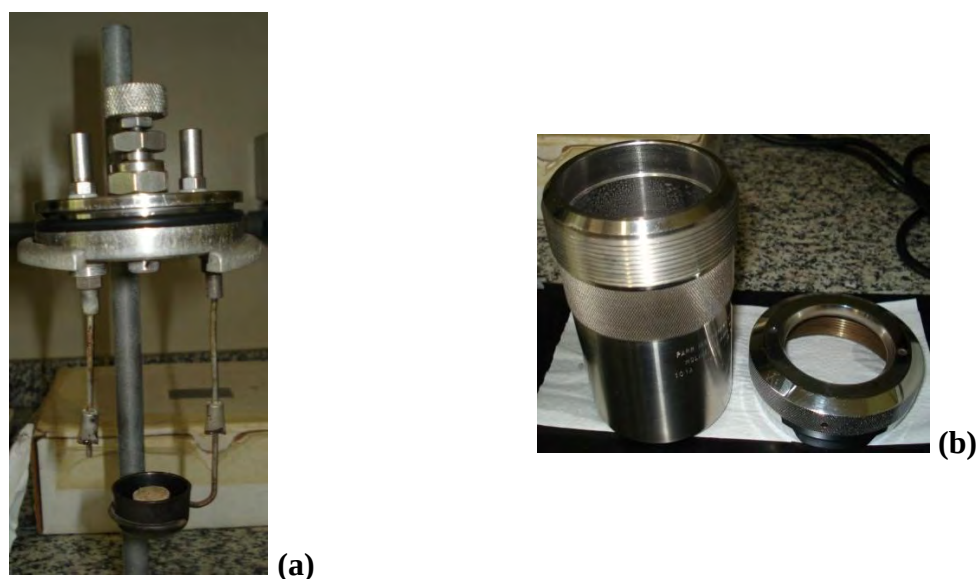


Figura 23 – (a) Tampa que contém as válvulas de entrada e saída de gases, (b) bomba calorimétrica e tampa vazada.

Adicionou-se 2,5 L (2,5 kg) de água destilada ao compartimento D (Figura 21) e oxigênio no interior da bomba (E) em quantidade suficiente para que fosse

possível a combustão completa da amostra. O calorímetro foi ligado e então deixado sob agitação até a verificação da estabilização térmica. Após a estabilização da temperatura, a ignição foi realizada. Verificou-se a variação da temperatura da água adicionada ao calorímetro antes e após a ignição, ou seja, antes e após a combustão da amostra.

A partir da equação 14 calculou-se a constante do calorímetro (K), conhecendo-se o PCS do ácido benzóico (6.318 cal.g^{-1}).

$$PCS = \frac{(K + M_a)}{M} \Delta t \quad (14)$$

Sendo:

PCS = poder calorífico superior, cal.g^{-1}

M_a = massa de água utilizada no calorímetro, g

Δt = variação de temperatura antes e após a combustão, $^{\circ}\text{C}$

K = constante do calorímetro, g

M = massa da amostra, g

Para determinação do PCS do bagaço e do palhiço foram confeccionadas pastilhas de 1,0 g e realizados os mesmos procedimentos anteriores. Agora conhecendo a constante do calorímetro, a equação 14 pode ser usada para o cálculo do PCS das amostras de bagaço e palhiço.

O poder calorífico inferior foi calculado pela equação 15 onde é descontada a massa de água (REZENDE, 1997).

$$PCI = \left[PCS \cdot \left(1 - \frac{U}{100} \right) \right] - \left[\left(\frac{U}{100} \right) \cdot L_v \right] \quad (15)$$

Sendo:

PCI = poder calorífico inferior, cal.g^{-1}

L_v = calor latente de vaporização da água, 540 cal.g^{-1}

A Tabela 31 mostra as proporções das misturas bagaço e palhiço que foram estudadas. As medidas de poder calorífico foram realizadas com 10 repetições para cada amostra.

Tabela 31 - Misturas de bagaço/palhiço utilizadas para o estudo.

Amostra	Bagaço (%)	Palhiço (%)
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	0	100

5.4.2 Determinação da quantidade de vapor produzido na queima do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço

Segundo Pera (1990), a equação 16 permite calcular a quantidade de vapor produzido de acordo com a quantidade do combustível consumido. Assim utilizou-se esta equação para calcular a quantidade de vapor que poderia ser produzida na queima do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço, para safra de 2008.

$$V = \frac{\eta.M.PCI}{\Delta H} \quad (16)$$

Onde:

V = quantidade de vapor produzida pela queima do combustível, kg.h^{-1}

η = eficiência térmica da caldeira

M = massa úmida de combustível consumida, kg.h^{-1}

PCI = poder calorífico inferior do combustível, kcal.kg^{-1}

ΔH = diferença entre a entalpia do vapor na saída da caldeira e a entalpia da água de alimentação da caldeira, kcal.kg^{-1}

De acordo com as especificidades das caldeiras da Usina São Manoel, fornecidas pelo fabricante tem-se: $\eta = 86\%$ e $\Delta H = 625,5 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

A quantidade de vapor produzida, de acordo, com a equação 16 foi obtida em $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{h}$, permitindo a extrapolação para $t_{\text{vapor}}/\text{safr}$.

5.4.3 Estimativa do potencial de geração de energia do palhiço e bagaço na Usina São Manoel

Considerando os dados obtidos anteriormente, foi calculado, a partir da equação 17, a potência gerada pelo uso do bagaço e palhiço como combustíveis (GERMEK, 2005).

$$E_t = E_p + E_b \quad (17)$$

$$E_t = \frac{TCH}{3600} \cdot R \cdot 4,18 \left[\left(\frac{t_p}{t_c} \cdot frp \cdot PCI_{\text{palhiço}} \right) + \left(\frac{t_b}{t_c} \cdot PCI_{\text{bagaço}} \right) \right]$$

Sendo:

E_t = potência total gerada, MW

E_p = potência gerada pelo bagaço, MW

E_b = potência gerada pelo palhiço, MW

TCH = toneladas de cana-de-açúcar esmagada por hora na Usina São Manoel, t.h^{-1}

R = Rendimento global da transformação de calor gerado em eletricidade ($r = 0,20$)

frp = fração de palhiço recolhido (50%)

t_c = tonelada de cana-de-açúcar colhida, t

t_b = toneladas de bagaço produzido, t

t_p = toneladas de palhiço produzido, t

$PCI_{\text{palhiço}}$ = poder calorífico inferior do palhiço, Mcal.t_p^{-1}

$PCI_{\text{bagaço}}$ = poder calorífico inferior do bagaço, Mcal.t_b^{-1}

Levando-se em conta o período da safra em horas na usina em estudo foi obtida a potência gerada por safra:

$$E_{ts} = E_t.H \quad (18)$$

Onde:

E_{ts} = energia total gerada na safra, MWh

H = horas de moagem de cana-de-açúcar por safra, h

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Quantidade de biomassa residual de cana-de-açúcar (bagaço e palhiço) gerada pela Usina São Manoel.

A estimativa da quantidade de biomassa de cana-de-açúcar é necessária, pois permitirá obter a quantia de energia elétrica que a usina pode comercializar utilizando o bagaço excedente e o palhiço, que atualmente é deixado no campo após a colheita mecânica.

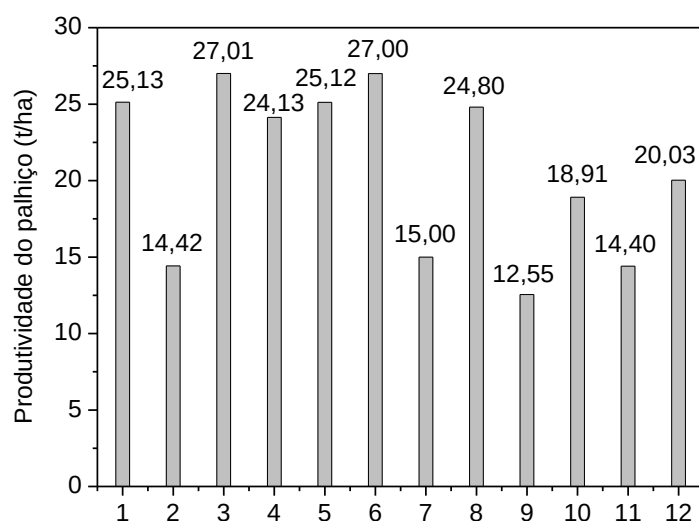
A quantidade de bagaço depende de algumas características da cana-de-açúcar a ser moída, sendo o teor de fibra o fator principal. A umidade do bagaço também determina a sua quantidade. O teor médio de fibra da cana-de-açúcar na Usina São Manoel na safra de 2008 foi de 12,57% e o teor de umidade 49,81%. Considerando os valores de fibra e umidade mencionados poderia ser produzido aproximadamente 25,23% de bagaço em relação a quantidade de cana-de-açúcar moída. Na safra de 2008 foram moídas 2.923.912 t de cana-de-açúcar, e foram produzidas 726.735 t de bagaço, o que corresponde a 24,84%. Os dados de produção, consumo, venda, doação e estoque de bagaço na safra de 2008 já foram apresentados na Tabela 24. Esses dados mostraram que na safra de 2008 cerca de 8,67% (62.994 t) do bagaço gerado não foi consumido sendo considerado, portanto, como excedente.

A Tabela 32 apresenta valores de produtividade do palhiço na Usina São Manoel.

Tabela 32 - Produtividade do palhiço recolhido em área pertencente a Usina São Manoel.

AMOSTRA	Palhiço (kg.m ⁻²)	Palhiço (t.ha ⁻¹)
1	1,045	10,45
2	1,135	11,35
3	1,685	16,85
4	1,755	17,55
5	1,840	18,40
6	2,255	22,55
7	2,325	23,25
8	2,465	24,65
9	2,630	26,3
10	2,900	29,00
Média	2,003	20,03
Desvio padrão	-----	6,18
Coefficiente de variação (%)	-----	30,86

Conforme mostra a Figura 24, vários trabalhos tem mostrado a elevada variabilidade da produtividade do palhiço, sendo encontrado valores que vão de 12,55 t.ha⁻¹ até 27,01 t.ha⁻¹. A média estimada de palhiço na área experimental deste estudo foi de 20,03 t.ha⁻¹, estando coerente com outros estudos.



- (1) TOLENTINO et al., 2003
- (3) TORREZAN, 2003
- (4) FRANCO, 2003
- (5) SARTORI, 2001
- (6) BIZUTI, 2003
- (7) DE LUCA, 2002
- (8) WALTER, 1993
- (9) MOLINA Jr., 1995
- (10) FURLANI NETO et al., 1997
- (12) DADOS DA PESQUISA

Figura 24 - Produtividades do palhiço – comparação entre diversos estudos.

Observando os dados da Tabela 32, percebe-se que o palhicho não está regularmente distribuído sobre o solo pois apresentou produtividade variável apesar de estar numa mesma área, sob mesmas condições de clima, declividade e variedade. Como já citado, Torrezan (2003) acredita que um dos fatores que pode influenciar na produtividade do palhicho é o tempo decorrido entre a colheita mecanizada e a coleta das amostras. O palhicho foi coletado no dia 13 de setembro de 2009, enquanto a cana-de-açúcar foi colhida nos dias 10, 11 e 12 de setembro de 2009, portanto supõe-se que essa diferença entre as datas da colheita da cana-de-açúcar e a colheita do palhicho possa ter interferido na produtividade. A umidade poderia ser a causa para a diferença de produtividade, ou seja, o palhicho recolhido mais tardiamente teria menor umidade e menor massa. Como será verificado mais adiante, não foi observada grande diferença de umidade para as diferentes amostras de palhicho, descartando essa hipótese.

Ripoli (2002) realizou o mapeamento do palhicho enfardado em uma área colhida mecanicamente sem queima prévia. O palhicho foi enfardado e recolhido 10 dias após a colheita. Obteve valores entre 4,74 e 14,56 t.ha⁻¹ de palhicho enfardado, e como média geral, o valor de 8,79 t.ha⁻¹, com coeficiente de variação de 30,03%. Os dados de produtividade obtidos por ele comprovam que a variabilidade espacial do palhicho é realmente grande. A justificativa para a variabilidade na produtividade do palhicho, dada pelo autor, e que cabe também a este estudo, refere-se a ocorrência de significativas variabilidades espaciais no número de colmos industrializáveis por metro linear de fileira de plantio dos canaviais; a relação entre massa de colmos e massa de palhicho, num canavial, é chamado de Índice de Palhicho (IP), portanto se há uma variabilidade no número de colmos por metro linear de fileira, observa-se também uma variabilidade na quantidade de palhicho por unidade de área.

A Figura 25 apresenta um histograma de distribuição dos valores da produtividade de palhicho deste estudo, usando quatro intervalos.

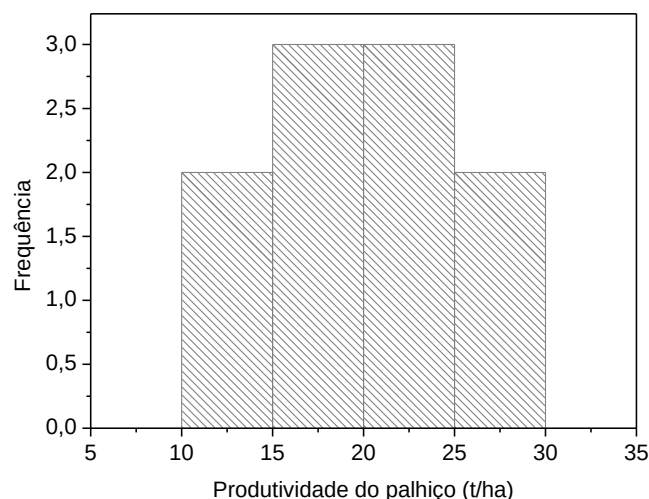


Figura 25 - Frequência das faixas de produtividade do palhiço (histograma).

O histograma permite verificar que há uma maior freqüência nos valores entre 15 e 25 $t.ha^{-1}$, estando a média ($20,03 t.ha^{-1}$) contida neste intervalo.

A produtividade agrícola de colmos da Usina São Manoel na safra de 2008 foi de $99,36 t_{cana}.ha^{-1}$. A relação entre a quantidade de palhiço ($20,03 t.ha^{-1}$) e o rendimento agrícola da cana-de-açúcar ($99,36 t.ha^{-1}$) permite obter uma quantidade de $0,20 t_{palhiço}/t_{cana}$. Deve ser lembrado que a disponibilidade do palhiço para uso como combustível é de 50%, portanto a quantidade de palhiço será de aproximadamente $0,10 t_{palhiço}/t_{cana}$ ($100 kg_{palhiço}/t_{cana}$). Na safra de 2008 foram colhidas 677.619,280 t de cana-de-açúcar crua, deste modo, 67.761,938 t de palhiço estiveram disponível para recolhimento e uso como combustível.

Somando-se, para safra de 2008, a quantidade de bagaço e palhiço disponível é observado uma disponibilidade de 794.496,94 t de biomassa. Deve ser salientado que este valor é em base úmida, com bagaço apresentando umidade média de 49,81% e o palhiço de 28,7%.

A Tabela 33 apresenta os resultados referentes a separação das amostras de palhiço em seus constituintes. Nota-se que a maior parte do palhiço é formado pelas folhas secas, seguido das folhas verdes e em menor quantidade de material restante.

Tabela 33 - Constituintes do palhicho após a separação.

AMOSTRA	Palhicho (t.ha ⁻¹)	Folhas verdes (g - %)	Folhas secas (g - %)	*Material restante (colmos, ponteiros, matéria estranha) (g - %)
1	10,4	117 – 11,2	793 – 75,9	90 – 8,6
2	11,3	100 – 8,8	910 – 80,2	70 – 6,2
3	16,8	312 – 18,5	1148 – 68,1	135 – 8,0
4	17,5	336 – 19,1	1085 – 61,8	247 – 14,0
6	22,5	255 – 11,3	1675 – 74,3	179 – 7,9
7	23,2	400 – 17,2	1660 – 71,4	125 – 5,4
Média	17,00	253 – 14,9	1212 – 71,3	141 – 8,3
Desvio padrão	-----	4,4%	6,4%	3,0%
Coefficiente de variação (%)	-----	30,8	8,9	36,2

* Não inclui o teor de impurezas minerais (terra) do palhicho.

A análise destes dados mostra que ocorre variabilidade nos constituintes das diferentes amostras de palhicho. Dessa forma confirma-se que, assim como a produtividade total de palhicho, a quantidade dos constituintes também é função das inúmeras variáveis já citadas anteriormente.

6.2 Teor de impurezas minerais (terra) do palhicho

As impurezas minerais contidas no palhicho podem causar problemas nas grelhas das fornalhas das caldeiras, além de diminuir a quantidade de energia líquida disponível. Portanto é desejável que o teor de terra seja o menor possível.

Dependendo de condições edafo-climáticas no momento da colheita do canavial e/ou do recolhimento do palhicho, associado ao tipo de sistema de retirada do campo, a quantidade de terra é bastante variável (ENERGIA..., 2004).

A Tabela 34 apresenta o teor de impurezas minerais presentes nas amostras de palhicho recolhidas.

Tabela 34 – Teores de impurezas minerais do palhiço

AMOSTRA	Impurezas minerais (%)
1	4,6
2	4,4
3	5,1
4	4,7
5	7,1
6	6,7
Média	5,4

Os resultados deste estudo apresentam ordem de grandeza semelhante a outros trabalhos conforme mostra a Figura 26. Deve ser salientado que os trabalhos mencionados na Figura 26 se diferem em relação às metodologias de recolhimento, bem como as condições gerais de campo.

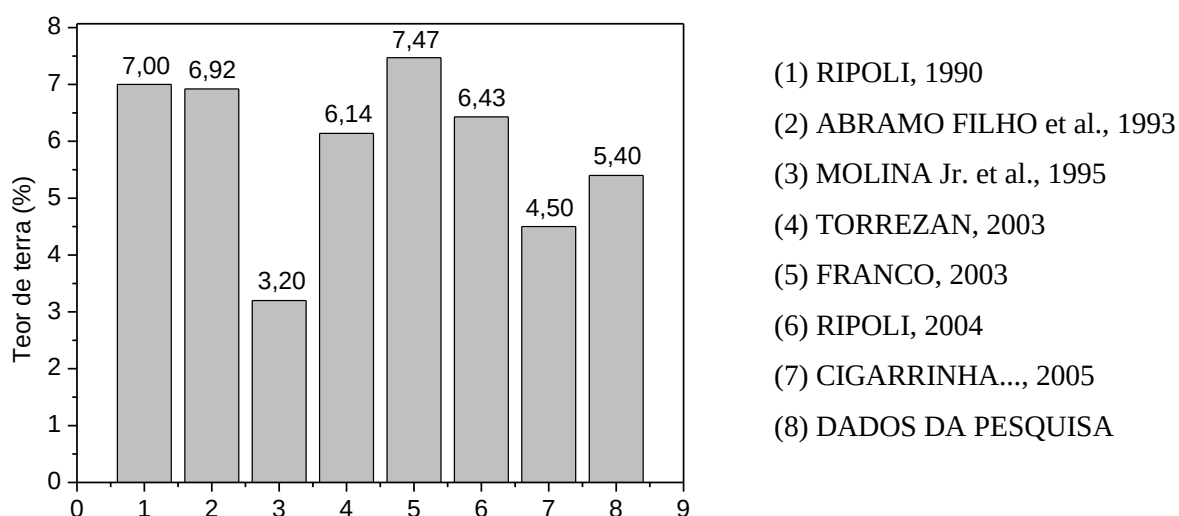


Figura 26 – Teores de terra do palhiço – comparação entre diversos estudos.

Medidas realizadas no laboratório da Usina São Manoel mostram que o bagaço possui impurezas minerais da ordem de 3,25%. Uma vez que neste estudo, os valores encontrados para o palhiço são da ordem de 5,40%, pode-se inferir que provavelmente não serão necessárias grandes alterações nas caldeiras para se processar a queima conjunta bagaço+palhiço, visto que atualmente se utiliza cerca de 20% de palhiço na mistura.

6.3 Caracterização energética do bagaço e palhiço gerados pela Usina São Manoel

6.3.1 Teor de umidade e potencial energético do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço

Como já citado anteriormente no procedimento experimental o teor de umidade do bagaço é determinado diariamente no laboratório industrial da Usina São Manoel. A média percentual na safra de 2008 foi de 49,81%.

A Tabela 35 mostra o teor de umidade de cada constituinte do palhiço e a umidade ponderada do palhiço como um todo.

Tabela 35 – Teores de umidade dos constituintes do palhiço.

AMOSTRA	UMIDADE (%)			
	Folha verde	Folha seca	Material restante	Umidade ponderada
1	49,2	18,8	67,6	27,9
2	51,4	21,0	68,0	29,9
3	50,3	18,5	67,3	27,8
4	52,1	21,5	68,1	30,4
5	49,7	19,0	69,4	28,3
6	51,0	18,2	69,7	27,9
Média	50,6	19,5	68,3	28,7

Foram encontrados na literatura valores de umidade entre 22,34% e 46,11% e são mostrados na Figura 27. O teor de umidade deste estudo mostrou-se coerente com o obtido por outros pesquisadores, porém deve ser salientado que a umidade do palhiço depende do tempo transcorrido entre a colheita da cana-de-açúcar e o recolhimento do palhiço, além das condições climáticas.

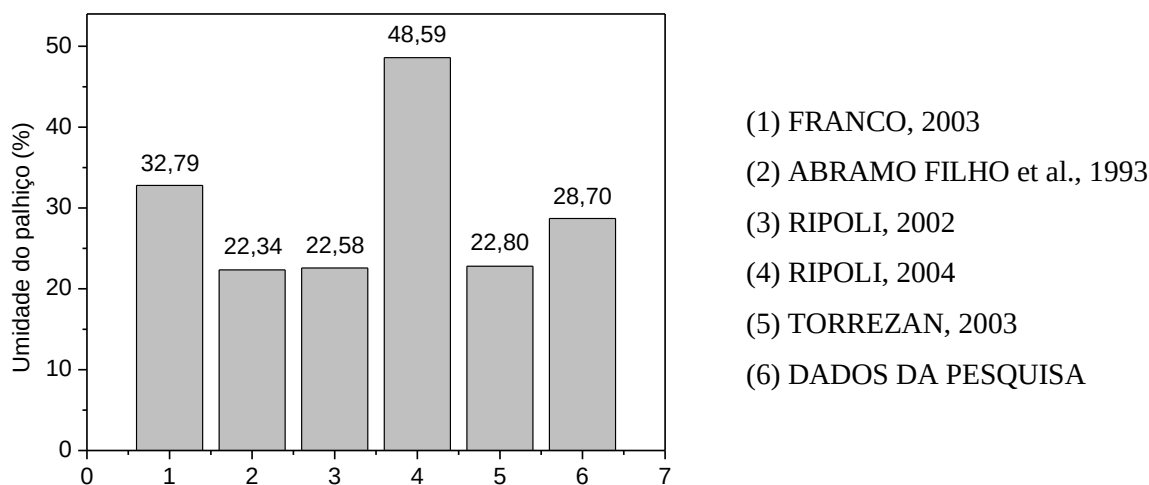


Figura 27 - Teores de umidade do palhiço – comparação entre diversos estudos.

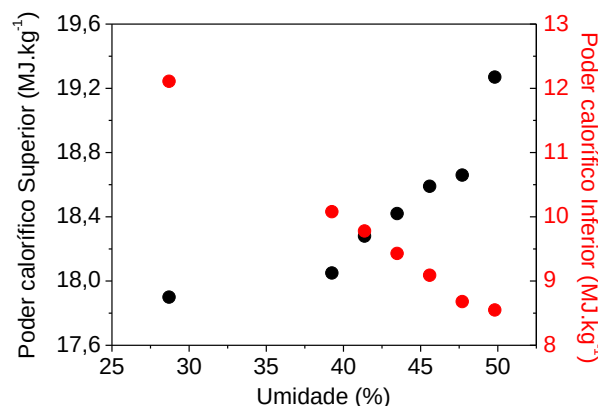
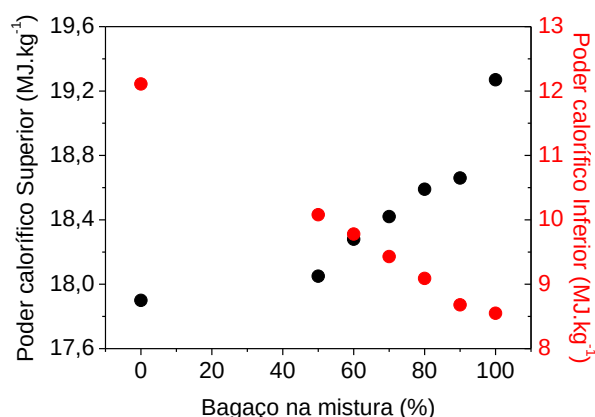
A Tabela 36 apresenta os resultados para o poder calorífico do bagaço, palhiço, e misturas bagaço/palhiço. Foram realizadas 10 medidas para cada amostra e a Tabela 35 apresenta a média dessas medidas.

Tabela 36 - Umidade, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e potencial energético para o bagaço, palhiço e misturas.

Amostra	Umidade média (%)	Poder Calorífico Superior (MJ.kg ⁻¹)	Poder Calorífico Inferior (MJ.kg ⁻¹)	Potencial energético (EBP.t ⁻¹)	Potencial energético (EBP.ha ⁻¹)
Bagaço (100%)	49,81	19,27	8,55	1,40	35,15
Palhiço (100%)	28,70	17,90	12,11	1,98	39,76
Bagaço (50%) - Palhiço (50%)	39,25	18,05	10,08	1,65	-----
Bagaço (60%) - Palhiço (40%)	41,37	18,28	9,78	1,60	-----
Bagaço (70%) - Palhiço (30%)	43,48	18,42	9,43	1,54	-----
Bagaço (80%) - Palhiço (20%)	45,59	18,59	9,09	1,49	-----
Bagaço (90%) - Palhiço (10%)	47,70	18,66	8,68	1,42	-----

Os resultados mostraram maior PCS para o bagaço e menor para o palhiço, sendo que as misturas tiveram um pequeno aumento no PCS conforme houve aumento da quantidade de bagaço na mistura. O poder calorífico inferior (PCI) foi calculado e observou-se uma inversão nos valores, sendo que para o palhiço a energia liberada no processo de combustão é maior em relação aquela liberada na combustão do bagaço, e maior

PCI é observado para as misturas com maior quantidade de palhiço, conforme pode ser melhor visualizado através da Figura 28(a). Esse resultado pode ser entendido considerando-se a umidade, que foi maior para o bagaço em relação ao palhiço e, portanto o $PCI_{\text{palhiço}}$ deve ser maior que o $PCI_{\text{bagaço}}$ (Figura 28(b)). Dentre as misturas de bagaço-palhiço analisadas, a de 50%-50% foi a que apresentou maior PCI. A quantidade de energia que efetivamente pode ser obtida de um determinado combustível é proporcional ao valor de seu poder calorífico inferior (PCI), assim os resultados obtidos mostram que o palhiço, atualmente deixado no campo após a colheita mecânica da cana-de-açúcar, pode ser um combustível eficiente para produção de energia quando incorporado ao bagaço, em especial na proporção de 50%.

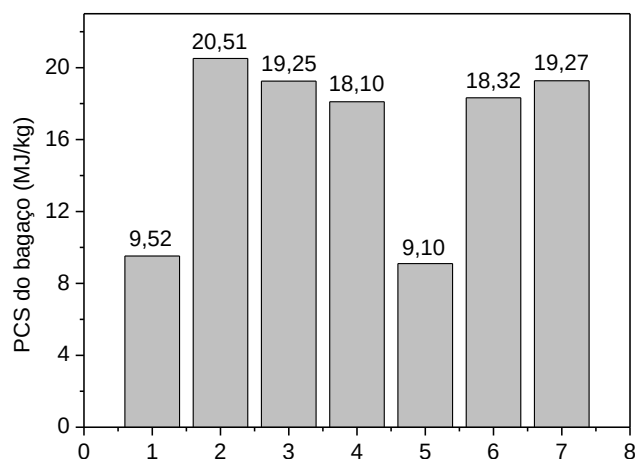


(a)

(b)

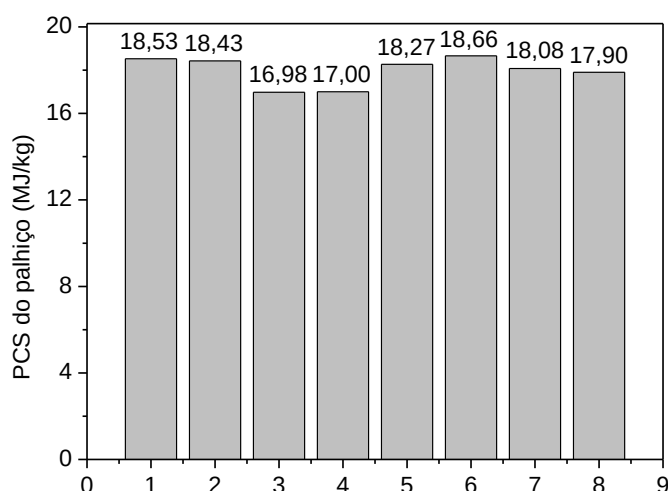
Figura 28 - (a) Comparação entre o PCS e PCI para as diferentes misturas de bagaço+palhiço, (b) comparação entre o PCS e PCI para as diferentes umidades das misturas de bagaço+palhiço.

A Figura 29 mostra os resultados para o poder calorífico do bagaço e palhiço obtido por outros autores. Estes resultados mostram-se coerentes com os obtidos nesse estudo. Foi realizada a comparação utilizando somente os valores de poder calorífico superior, pois este é referente ao material seco, enquanto o poder calorífico inferior considera a umidade do combustível.



- (1) SILVA e MORAIS, 2008
- (2) AGUILAR et al., 1989
- (3) NYAMUZIHOWA, 1999 apud MBOHWA e FUKUDA, 2003
- (4) HASSUANI et al., 2005
- (5) CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA, 2010
- (6) RIPOLI et al., 2000
- (7) DADOS DA PESQUISA

(a)



- (1) RIPOLI, 1991
- (2) TORREZAN, 2003
- (3) HASSUANI, 2005
- (4) CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA, 2010
- (5) FURLANI NETO et al., 1997
- (6) FURLANI NETO et al., 1997
- (7) MOLINA Jr. et al., 1995
- (8) DADOS DA PESQUISA

(b)

Figura 29 – Poderes caloríficos superiores para o (a) bagaço e (b) palhço – comparação entre diversos estudos.

Um barril de petróleo contém $6,1 \cdot 10^9$ Joules (ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ENGENHARIA, 2010). Assim, com base, no poder calorífico inferior do bagaço, palhço e suas misturas foi estimada a quantidade média de energia, em equivalente barril de petróleo (EBP) por tonelada de cana-de-açúcar plantada (Tabela 35). Considerando a produtividade do palhço como $20,03 \text{ t.ha}^{-1}$ e do bagaço na usina em estudo como $25,07 \text{ t.ha}^{-1}$ para safra de 2008 obteve-se o EBP por hectare de cana-de-açúcar plantada. Verifica-se que,

dentre as misturas a de 50-50% possui o maior potencial energético, e que o bagaço e o palhiço juntos possuem potencial energético, em um hectare de plantação, equivalente a aproximadamente 75 barris de petróleo.

6.3.2 Quantidade de vapor produzido na queima do bagaço, palhiço e misturas de bagaço/palhiço

Dados fornecidos pela Usina São Manoel mostraram que na safra de 2008 foram consumidos nas caldeiras cerca 140,66 toneladas de bagaço por hora, dos quais $28,99 \text{ t}_{\text{bagaço}} \cdot \text{h}^{-1}$ nas caldeiras 1, 2 e 3 e $53,67 \text{ t}_{\text{bagaço}} \cdot \text{h}^{-1}$ na caldeira 4 (Tabela 27). Aplicando-se a equação 16 para o bagaço foi possível constatar uma produção total de 395 toneladas de vapor por hora para safra de 2008.

Para que o palhiço ou as misturas bagaço+palhiço produzam a mesma quantidade de vapor que o bagaço ($395 \text{ t}_{\text{vapor}} \cdot \text{h}^{-1}$) em uma safra, calculou-se com a equação 16 a quantidade de combustível ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) necessária.

Considerando os mesmos valores de eficiência térmica (86%) e diferença calórica vapor/água ($625,5 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$), e de acordo com o PCI de cada amostra, foram obtidos os valores de massa de combustível consumida, conforme dados da Tabela 37.

Tabela 37 - Massa de combustível consumida para produção de $395 \text{ t}_{\text{vapor}} \cdot \text{h}^{-1}$.

Amostra	Poder Calorífico Inferior ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Massa de combustível consumida ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
Bagaço (100%)	2.042,205	140.660
Palhiço (100%)	2.894,036	99.270
Bagaço (50%) - Palhiço (50%)	2.408,374	119.289
Bagaço (60%) - Palhiço (40%)	2.338,029	122.878
Bagaço (70%) - Palhiço (30%)	2.253,348	127.496
Bagaço (80%) - Palhiço (20%)	2.171,022	132.331
Bagaço (90%) - Palhiço (10%)	2.074,367	138.497

Como já mostrado anteriormente, foi estimado que 67.762 t de palhiço estiveram disponíveis para recolhimento e uso como combustível na safra de 2008. Nesta mesma safra, foram produzidas 736.826 t de bagaço. Somando-se, para safra de 2008, a quantidade de

bagaço e palhiço foi observada uma disponibilidade de 804.588 t. Ainda com o uso da equação 16 calcularam-se quantas toneladas de vapor o bagaço e o palhiço poderiam ter produzido na safra de 2008. A Tabela 38 mostra esses valores.

Tabela 38 – Disponibilidade de bagaço e palhiço na safra de 2008 na Usina São Manoel e quantidade de vapor que poderia ser produzido caso todo bagaço e palhiço fossem usados como combustível nas caldeiras.

	Disponibilidade na safra de 2008 (t)	Quantidade de vapor produzida (kg)
Bagaço	726.735	2.040.546
Palhiço	67.762	269.625
Total	794.497	2.310.171

6.3.3 Potencial de geração de energia do palhiço e bagaço na Usina São Manoel

A Tabela 39 mostra os resultados obtidos no cálculo da potência total (MW) e energia total (MWh) que poderiam ser geradas na safra de 2008 considerando-se que a cana-de-açúcar fosse totalmente (100%) colhida crua e o que efetivamente ocorreu, ou seja, apenas 23,2 % de cana-de-açúcar colhida crua.

Os cálculos foram efetuados para o uso de todo bagaço de cana-de-açúcar produzido ($0,25 \text{ t}_{\text{bagaço}}/\text{t}_{\text{cana}}$), bagaço excedente em relação ao consumo próprio ($0,021 \text{ t}_{\text{bagaço excedente}}/\text{t}_{\text{cana}}$), 50% do palhiço disponível ($0,1 \text{ t}_{\text{palhiço}}/\text{t}_{\text{cana}}$), bagaço total + palhiço e bagaço excedente + palhiço.

Tabela 39 – Potência e energia que poderiam ser geradas na safra de 2008 de acordo com o uso da biomassa residual da cana-de-açúcar.

Uso da biomassa	¹Potência total gerada (MW)	¹Energia total gerada (MWh)	²Potência total gerada (MW)	²Energia total gerada (MWh)
Bagaço total	73,39	346.309	73,39	346.309
Bagaço excedente	6,37	30.058	6,37	30.058
Palhiço	41,94	197.904	9,72	45.866
Bagaço total + Palhiço	115,33	544.213	83,11	392.175
Bagaço excedente + Palhiço	48,31	227.989	16,09	75.925

(1) Considerando 100 % de cana-de-açúcar colhida crua

(2) Considerando 23,2 % de cana-de-açúcar colhida crua

Os valores apresentados na Tabela 39 mostram que há um incremento energético significativo, quando utilizado o palhiço como combustível para geração de energia elétrica. A remuneração da comercialização da energia elétrica de acordo com a ANEEL (2010) para empreendimentos de geração a partir de fonte biomassa com o início do suprimento no ano de 2011 é de R\$ 154,18/MWh. Desse modo o faturamento da Usina São Manoel, se a mesma comercializasse toda energia oriunda do bagaço mais palhiço, seria de R\$ 83.906.760,34 considerando 100% de cana-de-açúcar colhida crua e R\$ 60.465.541,5 considerando 23,2% de cana-de-açúcar crua. Para o uso do bagaço excedente mais palhiço o faturamento seria de R\$ 35.151.344,02 considerando 100% de cana-de-açúcar colhida crua e R\$ 11.706.116 considerando 23,2% de cana-de-açúcar crua.

6.4 Considerações finais

Deve ser salientado que a Usina São Manoel ainda não utiliza o palhiço como combustível nas caldeiras e por isso não é possível determinar a eficiência exata das caldeiras para queima de palhiço e misturas. As usinas que usam palhiço misturado ao bagaço acreditam que não há alteração na eficiência das caldeiras, no entanto a quantidade de palhiço misturado ao bagaço não passa de 20% ⁽¹⁾.

As caldeiras são projetadas para queima de bagaço com 50% de umidade, porém outras usinas estão utilizando as mesmas caldeiras para queima do palhiço

(1) PEREA, L. A. **Informações** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <quideia@hotmail.com> em 8 set. 2010.

misturado ao bagaço. Devido ao fato de se utilizar a mesma caldeira, o palhiço deve ter suas dimensões reduzidas para que se misture ao bagaço formando uma mistura homogênea, com 50% de umidade, pois caso se utilize o palhiço com menor umidade, a caldeira não terá o mesmo controle de temperatura do vapor superaquecido e talvez não atinja sua eficiência de projeto, porque o combustível se queima rapidamente por sua característica de alto PCI. A proporção de mistura está sendo ainda pesquisada pelos usuários e se pretende chegar até 20% (PEREA, 2010).

Neste estudo de caso da Usina São Manoel, considerando que se todo o bagaço e palhiço fossem utilizados na safra de 2008, a mistura seria de 8,5% de palhiço e 91,5% de bagaço. Deve ser lembrado que em 2008, apenas 23,2% da cana foi colhida crua e o cálculo referente à quantidade de palhiço considerou que 50% deve permanecer no campo. Supondo ainda que 50% deve ficar no campo, mas que se 100% da cana fosse colhida crua, 292.007 t de palhiço seriam produzidas em 2008 correspondendo a uma mistura de aproximadamente 36,8% de palhiço e 63,2% de bagaço. Estes dados mostram que futuramente, quando a colheita mecanizada da cana-de-açúcar for totalmente concretizada, e as técnicas de recolhimento e transporte do palhiço até a usina estiverem bem estabelecidas, ainda não será possível obter uma mistura de 50% de palhiço e 50% de bagaço, que segundo os potenciais energéticos das misturas bagaço/palhiço obtidos neste estudo seria a “mistura ideal”. No entanto, independentemente de uma maior ou menor quantidade de palhiço a ser utilizado, verifica-se que existe um grande potencial de energia a ser utilizado para fins de cogeração não sendo mais recomendado a pré-operação de queima dos canaviais para a colheita.

7 CONCLUSÕES

O potencial energético da biomassa residual da cana-de-açúcar mostrou-se viável para uso na coeração de energia elétrica, ficando dependente de futuros estudos quanto ao seu potencial econômico para a comercialização do excedente.

Por meio das análises laboratoriais, ou seja, sem considerar as especificações técnicas das caldeiras e custos de transporte até a usina, verificou-se que o palhico atualmente deixado no campo após a colheita da cana-de-açúcar, pode ser eficiente para produção de energia quando misturado ao bagaço.

Dados os diferentes teores de umidade e diferentes poderes caloríficos, a mistura de 50 % de palhico com 50 % de bagaço foi a que se mostrou mais eficiente em termos energéticos.

Em 2008, a energia que poderia ser gerada por meio do bagaço excedente e do palhico aproveitável para queima, supondo-se que toda cana-de-açúcar fosse colhida crua, seria de 227.989 MWh, além da efetivamente produzida, o que proporcionaria um aumento de R\$ 35 milhões, no faturamento da Usina.

8 REFERÊNCIAS

ABRAMO FILHO, J. et al. Resíduo da colheita mecanizada de colheita de cana crua. **Açúcar & Álcool**, São Paulo, v. 67, n. 2, p. 23-25, 1993.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Documentos**: Leilão 005/2010. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/052010_Resultado_2011.pdf>. Acesso em: 28 set. 2010.

AGUILAR, A.; PENA, V.; FRIEDDMAN, P. B. La combustion de los residuos agrícolas de la caña de azúcar. Parte I: características de los combustibles. **Cuba Azúcar**, Havana, ene./mar., 40 p. 1989.

ALTAFINI, C. R. **Apostila sobre caldeiras**. Caxias do Sul: Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, 2002. 36 p. (Apostila Disciplina de Máquinas Térmicas – Curso de Engenharia Mecânica). Disponível em:
<<http://www.ebah.com.br/apostila-de-caldeiras-pdf-a19922.html>>. Acesso em: 15 dez. 2009.

ALVES, A. F. et al. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de energia, PUBVET: Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia, Londrina, v. 2, n. 29, 2008.** Disponível em: <<http://www.pubvet.com.br/texto.php?id=286>>. Acesso em: 15 dez. 2009.

ANUÁRIO brasileiro da cana-de-açúcar 2008. Santa Cruz do Sul: Gazeta, 2008. 127 p.
Disponível em:
<http://www.anuarios.com.br/port/versao_pdf.php?idEdicao=50&idAnuario=13#>. Acesso em: 13 fev. 2010.

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunumannii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama do 241Am.** 2005. 136 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA. DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal:** determinação do poder calorífico, NBR 8633. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ENGENHARIA. **Energia e alterações climáticas.** Disponível em: < http://www.apea.pt/xFiles/scContentDeployer_pt/docs/Doc460.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2010.

BAGATEX. **Analysis and prospects of rational utilization of sugar cane bagasse:** Bagatex program. Ribeirão Preto, 1984. 8 p. (Relatório interno).

BERNDES, G.; HOOGWIJK, M.; VAN DEN BROEK, R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 25, p. 1-28, 2003.

BIZUTI, S. F. G. **Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhiço de cana-de-çúcar:** alguns parâmetros e desempenho operacional e eficiência energética. 2003. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

BIZZO, W. A. Geradores de vapor. In: BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Campinas: UNICAMP, 2003. Cap. 4, p. 66-80.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia.** Brasília, 2010a. Disponível em:
<http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/SERVICOS/USINAS_DESTILARIAS/USINAS_CADASTRADAS/UPS_01-04-2010_0.PDF>. Acesso em: 02 mai. 2010.

_____. Ministério de Minas e Energia (Ed.). **Dados por fonte: bagaço de cana. Brasília, 2010b.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: 09 maio 2010.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G. **Colheita da cana-de-açúcar com auxílio mecânico.** Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/unimac/pdfs/Auxilio_Mecanico_Colheita_Cana.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2010.

BRAUNBECK, O. A. et al. (Org.) **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas: Ed. da Unicamp, 2002. (No prelo).

CAMARGO, C. A. et al. **Manual de recomendações: conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. 798 p.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Bagaço e palha de cana para fins energéticos.** Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=377&Itemid=1331>. Acesso em: 10 jan. 2010.

CIGARRINHA: inimiga da produtividade. **Revista Rural**, São Paulo, ed. 86, abr. 2005. Disponível em: <http://www.revistarural.com.br/Edicoes/2005/artigos/rev86_cigarrinha.htm>. Acesso em: 2 maio 2010.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2009/2010 – 3º levantamento: dezembro/2009.** Brasília, 2009. 14 p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento2009_dez2009.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2010.

COPERSUCAR. **Cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp>. Acesso em: 23 jan. 2010.

CORDEIRO, A. Etanol para alimentar carros ou comida para alimentar gente? In: PLATAFORMA BNDES. **Impactos da indústria canavieira no Brasil: poluição atmosférica, ameaça a recursos hídricos, riscos para produção de alimentos, relações de trabalho atrasadas e proteção insuficiente à saúde de trabalhadores.** [S.I.]: Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas, 2008. Cap. 1, p. 9-22.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da co-geração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. 174 f. Tese (Mestrado em Ciências/Planejamento Energético)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro**. Brasília, DF: Sustainable Energy Technology, 2002. 116 p.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMES, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2008. 728 p.

COUTO, L. C. et al. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

CRISPIM, J. E.; VIEIRA, S. A. **Cana-de-açúcar: boa alternativa agrícola e energética para a agricultura nacional**. Disponível em: <<http://www.planetaorganico.com/trabcana1.htm>>. Acesso em: 10 set. 2009.

DE LUCA, E. F. **Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. 2002. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências)-Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

DIXON, T. F. Steam generation and combustion research at the SRI. **International Sugar Journal**, Tunbridge Wells, v. 101, n. 1204, p. 219-220, 1999.

EID, F; CHAN, K.; PINTO, S. S. Mudanças tecnológicas e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Recife, v. 2, n. 1, p. 48-57, 1998.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco energético nacional 2008: ano base 2007**. Brasília, 2008. 244 p. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2008.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2009.

_____. **Plano decenal de expansão de energia 2008/2017**. Brasília, 2009. 432 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20091119_1.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2009.

ENERGIA desperdiçada. **Revista AlcoolBrás**, n. 86, jul/ago 2004. Disponível em: <http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_86/ed_86_3.html>. Acesso em: 01 set. 2010.

EQUIPE EDUCAREDE (Ed.). **Energia**. Disponível em: <http://www.educarede.org.br/educa/index.cfm?pg=oassuntoe.interna&id_tema=6&id_subtema=9>. Acesso em: 10 mar. 2009.

ESCOBAR, M. R. Viabilidade econômico-financeira da energia co-gerada do bagaço de cana *in natura*. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 33, n. 9, p. 14-27, 2003.

FERREIRA, O. C. Teor de carbono em combustíveis da biomassa. **Economia e Energia**, Rio de Janeiro, n. 57, p. 41-47, 2006.

FRANCO, F. N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a granel**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T. C.; VILLA NOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhiço remanescente de colheita mecânica. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 4, p. 24-27, 1997.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo, In: **CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL**, 2006, Campinas. Disponível em: <<http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/54.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2008.

GERMEK, H. A. **Análise de decisão sobre o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, posto na unidade industrial, para fins de cogeração**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. **Revista da Madeira**, n. 110, 2008. Disponível em:

<[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento%20de%20res%C3%ADduos%20para%20biomassa%20%C3%A9%20rent%C3%A1vel)>. Acesso em: 10 maio 2008.

GRIMONI, J. A. B.; GALVÃO, L. C. R.; UDAETA, M. E. M. **Iniciação a conceitos de sistemas energéticos para o desenvolvimento limpo**. São Paulo: Ed. da USP, 2004. 308 p.

GUIMARÃES, O. Eletricidade vegetal. **O Sulco**, Horizontina, v. 112, n. 27, p. 6-9, 2007.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD Brasil, Centro de Tecnologia Canavieira. 2005. 216 p.

HIGA, M. **Cogeração e integração térmica em usinas de açúcar e álcool**. 2003. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica/Térmica e Fluidos)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

HILSDORF, J. W. et al. **Química tecnológica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 340 p.

HOWE, R.; SREESANGKOM, P. **Costs and performance of equipment for baling sugarcane tops and leaves**. Winrock International Draft report, Office of Energy Bureau of Science and Technology, USA. United States Agency of International Development, 1990. 56 p.

IDEANEWS. Com maior densidade. **Revista Ideanews**, Ribeirão Preto, v. 3, n. 19, p. 28-31, 2002.

JANNUZZI, G. M. Uma avaliação das atividades recentes de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro. **Energy Discussion Paper**, Campinas, n. 2.64-01/03, p. 1-12, 2003.

JOSÉ, H. J. **Combustão e combustíveis**. Santa Catarina: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004. (Apostila Química Tecnológica Geral).

KAZAY, H. F.; LEGEY, L. F. L. Fontes alternativas de energia: o que o Brasil tem feito?. **Revista Brasil Sempre**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 10, p. 2-9, 2002.

KINOSHITA, C. M. Cogeneration in the Hawaiian sugar industry. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 35, p. 231-237, 1991.

LANZOTTI, C. R. **Uma análise energética de tendências do setor sucroalcooleiro**. 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

LEITE, W. B.; PINTO, L. A. O valor do bagaço como combustível. Avaliação do bagaço da cana-de-açúcar. **Coleção SOPRAL**, São Paulo, n. 4, p. 22-39, 1983.

LEME, R. M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana-de-açúcar**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MAUÉS, J. A. Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool. **Revista Engenharia**, São Paulo, n. 583, p. 88-95, 2007.

MBOHWA, C.; FUKUDA, S. Electricity from bagasse in Zimbabwe. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 25, p. 197-207, 2003.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MICHELAZZO, M. B. **Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhicho da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas)-Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MOLINA JR., W. F. et al. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 13, n. 5, p. 28-31, 1995.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NAGAOKA, M. P. T. **A comercialização da energia elétrica cogerada pelo setor sucroalcooleiro em regiões do estado de São Paulo**. 2002. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

NOGUEIRA, L. A. H. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005, 196 p.

OLIVEIRA, E. R. Bagaço de cana: um combustível que ainda não recebeu a devida atenção. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, n. 2, v. 4, p. 10-19, 1982.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, **Anais...** Campinas. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0119.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2008.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais cogeradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: exemplos de aplicações de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Energia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. 2. ed. São Paulo: Fama, 1990. 571 p.

PEREIRA JR., V.P. **Alternativas para a co-geração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira.** 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PERES, N. P. Curso de segurança, instalação, operação e manutenção de caldeiras a vapor. Instituto brasileiro de segurança, São Paulo, julho, 1978.

_____. **Eficiência em caldeiras na agroindústria canavieira.** Piracicaba: STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1982. 74 p.

PERES, S. et al. Caracterização e determinação do poder calorífico e do número de cetano de vários tipos de biodiesel através de cromatografia. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BODIESEL, 2., **Anais ...** 2007, Brasília. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2007/caracterizacao/11.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2008.

PERES, S. et al. Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria). **Bioresource Technology**, New York, v. 99, p. 6339–6345, 2008.

REZENDE, M. A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama.** 1997. 138 f. Tese (Livre-Docência)-Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

RIPOLI, M. L. C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos.** 2004. 213 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

_____. **Mapeamento do palhço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e do seu potencial energético.** 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

RIPOLI, M. L. C.; MENEGATTI, L. A. A.; RIPOLI, T. C. C. Biomassa e seu equivalente energético em algumas variedades de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO

CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 5., 1997, Piracicaba. **Resumos...** Piracicaba: EDUSP, 1997. v. 1, p. 511.

RIPOLI, M. L.; RIPOLI, T. C.; GAMERO, C. A. Colheita integral: Retrocesso ou barateamento do sistema? **Idea News**, Ribeirão Preto, v. 4, n. 28, p. 66-67, 2003.

RIPOLI, T. C. C. Alternativa energética. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v. 1, n. 4, p. 26-27, 2001.

_____. Bagaço e palhço de cana para cogeração: o governo joga contra. **Opiniões**, Ribeirão Preto, p. 38-38, 2005.

_____. **Utilização do material remanescente de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*):** equacionamento dos balanços energético e econômico. 1991. 150 f. Tese (Livre-Docência)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; MIALHE, L. G.; BRITO, J. O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível! **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n. 54, p. 18-23, 1990.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar:** colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009. 333 p.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JR., W. F.; RIPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 677-681, 2000.

RIPOLI, T. C. C. et al. Potencial energético de residuos de cosecha de la caña verde. **STAB - Açúcar Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 1, p. 22-28, 1991.

ROCHA, D. **Colheita de cana:** mecanizar ou humanizar. 2007. Disponível em: <<http://www.zootecniabrasil.com.br/sistema/modules/wfsection/article.php?articleid=35>> Acesso em: 05 jun. 2009.

RODRIGUES, L. D. et al. Uso de briquetes compostos para produção de energia no Estado do Pará. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0079.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2008.

SANTIAGO, F. L. S. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de *Eucalyptus* gerados no processo de fabricação de painéis de madeira.** 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

SARTORI, M. M. P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar.** 2001. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SCHMIDT, C. H. **Estudo da viabilidade econômica para a implantação de um sistema de cogeração de energia em uma usina sucroalcooleira.** 2008. 63 f. Projeto de fim de curso (Graduação em Engenharia Mecânica)-Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, C. R. A. et al. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 12, p. 25-36, 2004.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_077_543_11289.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2009.

SIMÕES, J. Aproveitamento da energia gerada com bagaço depende de estímulo, dizem empresários em *workshop*; agenda de P&D é apresentada. **Inovação Unicamp**, 2008. Disponível em: <http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/news-energia_bagaco080225.php>. Acesso em: 28 fev. 2010.

SISTEMAS geradores de vapor. Dijan Química Consultoria e Engenharia Ltda. 2004. Disponível em: <<http://www.dijan.com.br/sistemas-vapor.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2010.

SOUZA, N. F. A cogeração em usinas de açúcar: potência, termodinâmica e tecnologias. **Revista Panorama Rural**, n. 127, 2009. Disponível em: <<http://www.panrural.com.br/noticia.aspx?id=1236&edic=127>>. Acesso em: 19 jan. 2009.

STANIFORTH, A.R. Straw for fuel. In: STANIFORTH, A. R. **Straw for fuel, feed and fertilizer?** London: Farming, 1982. p. 40-69.

TAUBE, J. S. Palha energética. **CanaMix**, n. 23, p. 98-100, 2010. Disponível em: <<http://www.canamix.net/Conteudo/Edicoes/23-marco2010/CM23-TECINDUSTRIAL.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2010.

TOLENTINO, G. **Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

TOLENTINO, G.; FLORENTINO, H. O.; SARTORI, M. M. P. Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com menor custo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 729-735, 2007.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Produção de cana-de-açúcar do Brasil**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>>. Acesso em: 02 maio 2010.

USTILIN, E. J.; SEVERO, J. R. Cana de açúcar: proteger o ambiente e continuar gerando empregos. **Revista Gleba**, Piracicaba, 2001. Disponível em: <<http://www.cna.org.br//gleba99/2001/Set/cana01.htm>> Acesso em: 10 set. 2009.

VALE, A. T.; FIEDLER, N. C.; SILVA, G. F. Avaliação energética da biomassa do cerrado em função do diâmetro das árvores. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 115-126, 2002.

VASCONCELOS, G. C. de et al. Energia lignocelulosica da biomassa: uma perspectiva sustentável. Resumos do II Congresso Brasileiro de Agroecologia. **Revista Brasileira Agroecologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1017-1020, 2007.

VIAN, C. E. F. **Energia elétrica**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_131_22122006154842.html>. Acesso em: 04 out. 2009.

VIEIRA, G. **Avaliação do custo, produtividade e geração de emprego no corte de cana-de-açúcar, manual e mecanizada, com e sem queima prévia.** 2003. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

WALTER, A. C. S. Potencial energético da cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 11, n. 4, p. 29-34, 1993.

ZULUAF, W. E.; CAPORALI, S. A.; VIDEIRA, R. M. Cálculo preliminar da energia liberada anualmente na queima dos canaviais brasileiros. In: SIMPÓSIO SOBRE QUEIMA DE PALHA DE CANAVIAIS, 2., **Resumos...**Araraquara: CETESB, 1985, p. 1-7.